



RASC

Real Academia
Sevillana de Ciencias

El agua simulada

discurso pronunciado por el

Ilmo. Sr. D.

José Luis Manzanares Japón

en el acto de recepción como académico numerario
el día 17 de diciembre de 1996

EL AGUA SIMULADA

*Discurso pronunciado por el
Ilmo. Sr. D. JOSÉ LUIS MANZANARES JAPÓN,
en el Acto de su recepción como Académico Númeroario
celebrado el día 17 de Diciembre de 1996*

1. PRESENTACIÓN

Excmo. Señor Presidente, Ilustrísimos Señores Académicos, Señoras, Señores:

Tres sentimientos se mezclan en mi ánimo a la hora de pronunciar estas primeras palabras: pudor, agradecimiento y pena. Y lo hacen con tal intensidad que probablemente quiebren mi voz y empañen mis ojos más de una vez a lo largo de este acto.

Aunque la ciencia y su rigor han sido el norte de mi vida, siento pudor porque no me considero un científico al uso ni poseo todas las características que son exigidas normalmente para ocupar este sillón. Nunca he tenido paciencia para hacer una sola cosa ni temperamento para encasillarme en una especialidad única. Dios me ha hecho inquieto, curioso por todo, crítico con los que se creen sabios e impaciente por ver concretadas mis ideas.

Soy hombre que ama el estudio, que procura estar al día, que ha preferido aplicar los últimos avances científicos al mundo de la ingeniería antes que profundizar en un aspecto parcial de los mismos, y que ha trabajado intensamente en la modelización matemática de los medios continuos para poder hacer cosas tan distintas, apasionantes y divertidas como construir un puente inédito, diseñar una nueva compuerta inteligente u optimizar una inversión.

No me siento iconoclasta por dedicarme al mundo del agua, siendo profesor de estructuras, ni por haber creado un equipo de más de cien técnicos, que intenta extender el rigor científico a la obra civil, en lugar de centrar mi interés de forma exclusiva en un solo tema. Muchos de los hombres que han formulado el mundo de la hidráulica han sido también profesores de estructuras y activos ingenieros consultores.

Por eso, siento agradecimiento hacia esta Academia que, conociendo mis limitaciones, me hace el honor de ofrecerme un lugar en su seno. Prometo responder a semejante honra con mi modesto esfuerzo, rebosante de ilusión, para hacerme digno a tal nombramiento.

Mi gratitud se extiende también a Ana, mi mujer: ha soportado estóicamente muchas noches e incontables fines de semana de estudio; ha tenido que compartir su amor con una cabeza pensando en FORTRAN, y ha sido la guardiana infatigable del sentido común que me ha recordado la existencia de un mundo real evitando que me perdiera en otro abstracto más matemático.

Por último tengo que confesar mi pena por no contar con la presencia de mi padre en este acto. Aunque hace ya una década que lo perdí, no puedo evitar pensar en la satisfacción que habría tenido al ver a su hijo acogido por los científicos. Él conocía mi amor por la ciencia, mi conflicto a la hora de organizar mi actividad y hubiera sido hoy muy feliz. A su memoria y al cariño de los míos, que hoy me rodean, quiero dedicar mis palabras.

2. PRÓLOGO

«La tierra era soledad y caos, y las tinieblas cubrían el abismo; y el espíritu de Dios aleteaba sobre las aguas... Y Dios dijo: "Haya un firmamento entre las aguas que separe las unas de las otras". Y así fue: Dios hizo el firmamento separando por medio de él las aguas que hay debajo de las que hay sobre él. Dios llamó al firmamento cielo. Dios dijo: "Reúnanse en un solo lugar las aguas inferiores y aparezca lo seco"; y así fue. Dios llamó a lo seco tierra, y a la masa de las aguas llamó mares. Y vio Dios que esto estaba bien». (GÉNESIS I).

Más tarde, el sexto día, Dios crea al hombre y lo hace inteligente. Pero deja su mente en blanco, como si se tratara de un libro de páginas vacías en el que está pendiente de escribir todo el conocimiento. Curiosamente, el Creador elige dos archivos diferentes donde acumular la información sobre el ser: uno, aparentemente pequeño, situado en las células, donde esconde el secreto de la vida y otro, enormemente grande, destinado a almacenar el saber consciente, repartido por toda la imbricada trama del tejido que forma la humanidad, y que se sustenta en los cerebros de los hombres.

A partir de ese instante, va a ser una constante de la Naturaleza utilizar distintos órdenes, superpuestos en diferentes niveles y dimensiones: unos inferiores, pero no menos perfectos, que gobiernan a los individuos, elementos o partículas; y otros, superiores, que afectan a unas gigantescas estructuras organizadas, macroscópicas, que obedecen a leyes distintas y sólo se pueden percibir si se elige el punto de vista adecuado. Si se pierde perspectiva, desaparece aparentemente ese comportamiento ordenado a gran escala y al hombre le parece caótico y sin sentido porque lo observa sólo parcialmente. Pero si se busca con mirada amplia se encuentra la grandeza de la superestructura que obedece a leyes poderosas.

El primer archivo es bien descrito por el profesor LOSADA cuando dice: *«a los médicos escritores les debe causar pasmo y embeleso saber que en las entrañas de su cuerpo llevan grabado a sangre y fuego, y reimpresso cientos de billones de veces, un mensaje que en conjunto se compone nada menos que de un decimol de letras ($\approx 10^{23}$)»*. Se refiere, naturalmente, al código genético que se perpetua estable-

mente con las leyes de la herencia y que es mutado, excepcionalmente, sólo para producir cambios en las especies.

Para el segundo, Dios elige otro soporte donde almacenar a perpetuidad el saber consciente: la mente humana. A pesar de la corta vida de un hombre, y de su limitada capacidad, consigue encontrar el mecanismo que le permite procesar y acumular a lo largo de los siglos toda la información de la humanidad: la educación.

Sobre el planeta entero, a modo de un enorme cerebro extendido sobre toda su superficie, en el que cada cabeza equivale a una neurona, se mueve en un instante toda la información del conocimiento. Cada segundo muere un gran número de esas células, pero el saber no se pierde: nacen otras que, reciben el bagaje cultural y científico del momento, progresan y lo transmiten en su día a las que se incorporan posteriormente.

En una gigantesca carrera de relevos, los hombres se van pasando de unos a otros el testigo de la sabiduría. Un espectador que contemplara a la humanidad con visión macroscópica la percibiría como un único ser vivo que evoluciona siendo cada día más sabio y más consciente de la naturaleza de la realidad física. También la podría ver, en un especial sistema de coordenadas, como un fluido circulando con un comportamiento similar al del agua, pero que no está hecho de materia sino de intelecto.

Las ideas fluyen a lo largo del espacio y del tiempo como si fueran parte de la hidráulica. A veces ese fluir es lento y viscoso, otras rápido y turbulento. En ocasiones, se producen perturbaciones que se propagan, amplifican y generan estelas contagiosas; otras se amortiguan, desaparecen para siempre o, por el contrario, resurgen pasado un tiempo en el que han permanecido aparentemente dormidas.

El día de la creación, el día sexto, ese magnífico libro cuyas páginas la constituyen todas nuestras mentes, estaba en blanco. A lo largo de la historia, de nuestra breve historia, ese fluir de las ideas ha ido escribiendo los progresos del hombre en un titánico esfuerzo por comprender el por qué y el cómo de la existencia.

No ha sido una escritura fácil ni limpia. Ha constituido, por el contrario, un largo proceso lleno de continuas rectificaciones en el que ha habido que tachar falsas hipótesis, reescribir un gran número de líneas y mantener un permanente estado de duda sobre la validez de lo que permanece.

Aunque el libro contiene diversas secciones, a modo de enciclopedia, no puede mantenerlas estancas e independientes. Toda la ciencia se interrelaciona, y resulta sorprendente ir comprobando cómo en las distintas especialidades se encuentran idénticas raíces, metodologías similares y casi las mismas herramientas. El conocimiento parcial y especializado de la Naturaleza es más una división arbitraria y académica del saber que una réplica de la realidad.

Todo está tan vinculado, la vida y lo inerte, lo macroscópico y lo microscópico, la biología, la química y la física, la filosofía y la matemática que esa brusca separación que hacemos los hombres entre los distintos mundos científicos no es otra cosa que la respuesta a nuestra propia limitación y la rendición de una mente aislada, impotente a la hora de intentar recibir el contenido del cerebro de la humanidad.

Yo he elegido para el día de hoy, unas pocas páginas de ese gran libro. Pretendo reflexionar en voz alta sobre las mismas y las sugerencias científicas que turban mi ánimo a la hora de hojearlas. Porque son las que contienen la sección dedicada al agua dulce macroscópica, objeto de mis modestos trabajos profesionales e inquietudes sociales.

En la estantería han quedado todos los tomos que tratan del agua: fuente de vida, vehículo energético, reina de la biología, base de la química, constituyente de los mares y tantas otras facetas de la existencia en las que el preciado elemento plantea mil interrogantes y ofrece cientos de respuestas.

Pero con el espíritu pragmático que caracteriza a un ingeniero, he seleccionado sólo aquellos párrafos que tratan de algo tan vital como el ciclo hidrológico, el agua que nos cae del cielo, su camino de vuelta hacia el mar, su empleo por el hombre y las incertidumbres científicas que ese proceso conlleva.

Cuando uno lee las líneas del gran libro de la humanidad que tratan de este tema se encuentra con la sorpresa de que, por ahora, sólo hay escritos cuatro capítulos y apenas ha comenzado a redactarse el quinto. Sus títulos son sugerentes: *El agua mitológica; el agua imaginada; el agua formulada; el agua modelada y el agua simulada*. El último de ellos, el que hoy nos ocupa, está aún en sus balbuceos. Es mucho lo que queda por saber y, por tanto, pendiente de transcribirse a nuestro gran cerebro. Pero, por esa misma razón, estamos en una posición de privilegio para apuntar algunas reflexiones sobre las páginas, aún en blanco, que aún hay que rellenar.

Paradójicamente, cada uno de esos capítulos ha venido a cambiar la imagen que ya se había formado la humanidad de la realidad física en los anteriores. Parece como si, en determinados instantes de la evolución humana, se hiciera borrón y cuenta nueva y el hombre contemplara al mundo que lo rodea bajo una óptica completamente distinta. A pesar de que cada etapa ha significado, para los que la han vivido, el descubrimiento de la verdad absoluta, los hombres de las nuevas generaciones la han demolido, adoptando una visión diferente, en la creencia de que también la suya es la definitiva.

Por eso, la principal cualidad del científico debe ser la humildad y poseer una conciencia clara de que está escribiendo un capítulo del libro que, sin duda, será superado y desbordado por el próximo, que aún le resulta inimaginable dentro de las coordenadas en que se mueve.

Para hablar del agua simulada, y de los límites que todavía presenta para los que trabajamos con ella, conviene revisar los cuatro capítulos anteriores, aunque sólo sea para recibir una dosis de modestia que nos sitúe en el verdadero papel que estamos jugando: el de unas células que almacenan información en un libro que tiene por delante la hermosa tarea de comprender la verdad.

3. EL AGUA MITOLÓGICA

Al bucear en las profundidades de la historia más remota, aparece un hecho sorprendente: el hombre sabe utilizar el agua, la maneja con habilidad, incluso hace

prodigiosas obras de ingeniería, no muy diferentes de las actuales y, en cambio, no conoce la hidrología ni la hidráulica. No sólo hay un profundo divorcio entre la aplicación práctica y el conocimiento científico sino que las explicaciones a los fenómenos naturales son absolutamente disparatadas.

Tres mil años antes de Cristo se abastecen las ciudades, se las dota de alcantarillado y el agua se emplea inteligentemente en instalaciones para el regadío y algún uso industrial, pero su naturaleza queda inmersa en conceptos religiosos llenos de supersticiones.

En Mesopotamia los dioses del mar, de las riadas y de los ríos son perversos y temidos. Hay que aplacarlos con regalos y ofrendas. Por el contrario en Egipto, Hapi, dios del Nilo, es honrado y hasta amado por un pueblo agradecido que es consciente de los regalos que el gran río les otorga.

El propio autor del Génesis manifiesta el profundo desconocimiento del ciclo hidrológico que tienen aquellas generaciones cuando piensa que el agua de lluvia proviene de una fuente superior, almacenada sobre el firmamento en un gigantesco depósito celestial que descarga de vez en cuando sobre nuestras cabezas.

Un proverbio del período SHANG (1500-1050 a.d.c.) dice refiriéndose al río Amarillo en la China ancestral: «*Si no damos una esposa al dios del río, vendrá la riada, trayendo inundaciones y ahogando a las gentes*». Lo que implica que los sacrificios humanos son unas de las primeras herramientas de los ingenieros hidráulicos para controlar las aguas: especialmente tirar sus mujeres a la corriente cuando empiezan a resultar incómodas.

Se da además una práctica que hoy en día es tan inimaginable que nos produce envidia: los grandes constructores de las obras hidráulicas son reverenciados hasta alcanzar la categoría de mitos. La leyenda china glorifica a YU que, dos mil años antes de Cristo, domina a ese mismo río Amarillo, tras trece años de duros trabajos en los que quema bosques, perfora rocas, corta montañas, excava canales y traslada su desembocadura al mar de Pohai. No cabe duda de que los técnicos tenían más peso social que los ecólatras.

A lo largo de muchas generaciones los chinos han considerado a sus emperadores buenos o malos dependiendo de su éxito en la lucha con los grandes ríos. Los viejos textos están llenos de descripciones de imponentes malecones de encauzamiento que, a modo de gigantescas murallas, intentan contener con diversa fortuna las riadas. Pero no existe la menor indicación sobre medidas hidrológicas ni cálculos hidráulicos.

Entre el Tigris y el Eufrates se desarrolla en el inicio de los tiempos una red de cauces y acequias que permite aprovechar la fertilidad de las tierras con una agricultura de regadío que es una fuente de riqueza para sus pueblos. EL CÓDIGO DE HAMMURABI (1728-1686 a.d.c.) incluye el deber de desarrollar y mantener el sistema de canales.

Aunque la hidráulica de esa infraestructura de riego es espectacular, le sigue faltando el saber científico. Todas las obras son realizadas como un arte, que se transmite de padres a hijos, sin otra ciencia que la de prueba y error, empleando arcilla cocida, adobe con juncos y asfalto.

A pesar de los avatares de la Historia, las instalaciones son salvaguardadas a duras penas hasta el año 1265 de nuestra era. La invasión mongola las arrasa definitivamente, provocando la pérdida de la hegemonía de la región. Por aquel entonces viven allí veinte millones de habitantes que se encuentran súbitamente desprovistos de toda infraestructura hidráulica y se ven obligados a emigrar en busca de nuevos métodos de subsistencia. A principios del siglo XX, que es cuando comienzan a rehabilitarse de nuevo los canales para regar aquellas tierras, sólo permanecen en ellas millón y medio de personas.

En los milenios previos al nacimiento de Cristo la ingeniería del agua tiene su máximo esplendor en Egipto. Allí se emplaza la presa más antigua que se conoce: SADD-EL-KAFARA (2700 a.d.c.) de 14 metros de altura situada a 30 Km. al sur del Cairo y de la que aún se conserva una parte importante del pedraplén.

Se atribuye a SESOSTRIS V (1950 a.d.c.), la construcción del canal de navegación entre el Nilo y el mar Rojo, a través de Wadi Tumidat, que es reconstruido por Darío y mantenido hasta el 767 de nuestra era. De sus magnitudes nos da idea la descripción que del mismo hace HERODOTO que cuenta que tarda cuatro días en recorrerlo y que es tan ancho que se pueden cruzar cómodamente dos trirremes.

Es también en Egipto donde aparece la más vieja hidrometría de la Historia: los nilómetros. Son escalas calibradas, marcadas en las rocas o en las construcciones, que permiten medir los niveles. El país vive pendiente de las avenidas del Nilo, entre Julio y Setiembre, que inundan los valles con alturas de agua de hasta tres metros, lavan los suelos por filtración y depositan un limo orgánico fertilizante.

Hay toda una infraestructura de muros de defensa y redes de canales que funciona con más o menos éxito según las cotas que alcanza el río, que puede desbordar las banquetas o, por el contrario, no llegar a mojar las tierras. Si el Nilo sobrepasa la marca de la isla Elefantina, cerca de Assuan, se garantiza que cubrirá el país con un nivel medio; y cuando esto ocurre se celebra con grandes fastos.

Pero, a pesar de toda esta técnica, se sigue atribuyendo a la voluntad de Hapi el comportamiento hidrológico. Por eso resulta sorprendente para la época, que en el CHANDUGYA (800 a.d.c.), texto sagrado de los indios, se encuentre esta frase: *«los ríos descargan sus aguas en el mar, las nubes la suben al cielo como vapor y la liberan en forma de lluvia»*. Es sin duda la más vieja referencia al ciclo hidrológico y, asombrosamente, acertada. Pero tendrán que pasar muchos siglos antes de que esa descripción pase a formar parte indeleble del libro del saber humano.

Produce pasmo comprobar cómo, en determinados momentos históricos, aparece un conocimiento cierto y preciso, pero la humanidad lo ignora, cuando no lo rechaza, y su perturbación en el fluir de las ideas es amortiguada y no deja estela alguna. Por el contrario, muchas veces la opinión errónea es elevada a la categoría de verdad, crea escuela, provoca una alteración del flujo y se tardarán siglos en rectificar y anular la trayectoria equivocada.

Parece como si la Naturaleza tuviera miedo de que el conocimiento del hombre progrese rápidamente y persigue con todas sus fuerzas la aparición de la verdad. Si no, no se explica el éxito de los fanáticos y el poco aprecio que el mundo y los medios

de comunicación dan a los científicos y a los técnicos, en contraste con la credibilidad y audiencia que se da a los adoradores de ídolos, a los portavoces de sectas y a los que se dicen únicos dueños de lo natural.

4. EL AGUA IMAGINADA

Seiscientos años antes de Cristo la humanidad da un brusco salto en el desarrollo del intelecto: aparece la filosofía como un intento del hombre para comprender la naturaleza en su totalidad y reducir todos sus fenómenos a un número limitado de principios básicos. Probablemente, una perturbación genética en una célula provoca una bifurcación en el comportamiento estable del fluir del gran cerebro que nos ocupa, y comienza a escribirse el capítulo del agua imaginada a base de nuevos hombres que conmocionan el equilibrio intelectual de su entorno.

TALES DE MILETO (624-546) es el primer filósofo y también el pionero a la hora de afirmar que *«el agua es el origen de todas las cosas»*. Piensa que el mar es una base que tiene a la tierra encima, el agua salobre penetra por debajo, sube por los poros como en una esponja, pierde la sal por filtración y aparece formando fuentes. Esta tesis, que sobrevive hasta el renacimiento, viene a clarificar por qué este capítulo es el del agua imaginada.

Los filósofos intentan razonar un porqué lógico y físico para los procesos naturales, pero no utilizan el método científico de experimentar, observar, medir, hacer hipótesis y comprobar. Es mucho más importante para ellos el hecho de imaginar una explicación coherente a grandes rasgos, asumir una verdad no demostrada y sacar, a partir de ella, conclusiones estimadas como válidas con un razonamiento de tipo deductivo. Salvo excepciones, toda la aportación helenística al saber del agua es exclusivamente especulativa y no pertenece al mundo de la experimentación sino al de la imaginación.

En cualquier caso, y con grandes errores, los griegos comienzan a comprender el ciclo hidrológico. ANAXIMANDRO DE MILETO (610-545) descubre la evaporación, aunque son precisos ciento cincuenta años más para que a HIPOCRATES (460-380) se le ocurra pesar una vasija llena de agua y mantenerla así varios días comprobando que pierde peso porque el líquido es atraído por el sol, lo que no deja de ser un primer hito experimental.

También JENOFANES DE COLOFON (570-470) afirma que las nubes se forman por secreción del mar y que de ellas, a partir de la lluvia, nacen los ríos, disuelven la sal de la tierra y la aportan a los océanos. Esta tesis es mantenida con diferentes matices por diversos filósofos posteriores. Así EMPEDOCLES (500-430), DIOGENES (460-390) y ANAXAGORAS (500-428) coinciden en el mismo concepto del mecanismo hidrológico. El último de ellos, en su *«Meteorología»*, hace la primera descripción de un embalse subterráneo por infiltración.

Quizás el texto que mejor refleja el tipo de rigor de las hipótesis de la época lo escribe PLATON cuando dice *«La Tierra se benefició del riego anual de Zeus y no*

lo perdió como lo hace ahora, corriendo de la delgada capa de suelo fértil al mar, porque antes había mucho suelo, lo empapaba con la lluvia, lo guardaba calando el agua desde arriba hasta el fondo y produciendo ricas fuentes y ríos».

El nacimiento de ARISTÓTELES genera también una perturbación trascendente en el flujo del saber del gran cerebro: el planteamiento de una forma global de ver el mundo y la Naturaleza. A pesar de que es poco rigurosa, no se amortigua y deja detrás una importante estela que irá conmoviendo a las sucesivas mentes.

En la «Meteorología» interpreta y explica, bajo un punto de vista casi correcto, la evaporación, condensación, descenso de temperatura, formación de nubes, la lluvia, la nieve, el rocío y la escarcha. Pero cree que el aire se transforma en agua; piensa que la precipitación no es suficiente para formar los ríos y que es la condensación del aire de los poros de la Tierra la que proporciona las infinitas gotas que generan los cursos fluentes. Además, niega rotundamente la posibilidad del vacío, postura que condicionará gran parte del pensamiento de toda la edad media.

En cualquier caso, también existe en este cuarto de hora de la Humanidad otro punto singular, un hombre que nace fuera de su época y que marca un espectacular hito histórico: ARQUÍMEDES (287-212), posiblemente el matemático más grande de la historia y, curiosamente, con escasa influencia posterior. Su figura tardará siglos en dejar huella.

Natural de Siracusa, es en Alejandría donde estudia matemáticas, geometría y mecánica. Es un gran inventor: desde el tornillo que lleva su nombre, que aún sigue funcionando en la moderna industria actual, hasta el planetario, pasando por cientos de artefactos militares. Sin embargo, como buen científico, siente desprecio por estas espectaculares aplicaciones del saber, más propia de la casta de los ingenieros, y no se molesta en escribir nada sobre las mismas. En cambio se conocen diez manuscritos sobre sus aportaciones a la Ciencia. Gracias a ellos se sabe que, dos mil años antes de que NEWTON y LEIBNITZ expongan el cálculo moderno, ARQUÍMEDES inventa el cálculo integral y anticipa el diferencial.

Si se hubiera sentido orgulloso de sus experiencias ingenieriles, y hubiese dejado algún papiro refiriéndose a las mismas, no se plantearían dudas sobre la paternidad de su famoso tornillo. Atribuido a CTESIBIOS o a desconocidos artesanos, sólo una mente tan preclara como la de ARQUÍMEDES es capaz de inventar algo tan abstracto y poco intuitivo como su máquina elevadora.

En el «Tratado de los Cuerpos Flotantes» se ocupa de la hidráulica, y lo hace tan espléndidamente que LAGRANGE, dos mil años después, se descubre, con asombro y admiración, por la vigencia y validez de sus conclusiones. ARQUÍMEDES hace dos axiomas:

La naturaleza de los fluidos es tal que siendo sus partes continuas y uniformemente colocadas, aquélla que es menos presionada es desplazada por la que más; y cada parte es siempre presionada por el peso total de la columna perpendicularmente situada sobre ella, a menos que este fluido esté encerrado en algún recipiente o comprimido por alguna cosa.

Es garantizado que los cuerpos que son forzados hacia arriba en un fluido, lo son a lo largo de una perpendicular que pasa a través de su centro de gravedad.

De estos postulados derivan los teoremas básicos de la hidrostática. Son absolutamente correctos a pesar de que sólo tienen en cuenta la presión vertical sin percibir la horizontal.

La escuela de Alejandría no sólo forma a hombres como ARQUÍMEDES, sino que es cuna de grandes inventores que desarrollan todo un catálogo de aplicaciones hidráulicas sin poseer una base científica que las sustente. Un rosario de sifones, clepsidras, órganos hidráulicos, ruedas dentadas, bombas de pistones, molinos de agua, autómatas movidos por la fuerza del líquido o del vapor, esferas autopropulsadas, etc. harían hoy las delicias de los amantes de las curiosidades antiguas y del ingenio del hombre. Nombres como los de CTESIBIOS, FILÓN y HERON destacan en el período comprendido entre el siglo tercero antes de Cristo y el segundo de nuestra era.

En la Dioptra de HERON aparece por primera vez algo que aún tardará muchos siglos en ser admitido por el intelecto humano: el caudal es igual al área por la velocidad y, por tanto, es también volumen por unidad de tiempo. De ahí que la clepsidra más sencilla sea la del tanque alimentado con un chorro constante que mide las horas a medida que se va llenando. Esta aseveración, que hoy nos parece evidente, fue desconocida por los grandes ingenieros hidráulicos de la época y de los siguientes siglos.

Por ejemplo, VITRUBIO en «De Architectura Libri Decem» aporta su experiencia personal y las referencias históricas de las técnicas constructivas. El volumen octavo se ocupa del agua, fuentes, pozos y conducciones. Su concepto de la hidráulica es una mezcla de observaciones correctas, ideas mitológicas, interpretaciones mágicas y reglas técnicas. En ningún sitio demuestra conocer la influencia de la velocidad en el caudal.

Insinúa el principio de los vasos comunicantes, señala el peligro de rotura de los codos en los tubos, aporta la primera potabilizadora de aguas, consistente en una cisterna filtrante rellena de grava, y recomienda pendientes entre el dos y el cinco por mil para los acueductos. De hecho, construye algunos para el abastecimiento de Roma. Pero no da la menor explicación sobre su comportamiento ni hace ninguna consideración científica.

La Ciudad Eterna, que se abastece del Tiber, necesita atender a una demanda continuamente creciente, por eso tiene que construir casi un kilómetro de conducción por año para traer agua potable a la ciudad. Emplea cinco siglos en completar su red de acueductos y llega a tener quinientos kilómetros. Desde el Appia, construido el 312 a.d.c., hasta el Aqua Alejandrina el 226 d.d.c., se dota de una serie de once largos canales que transportan el recurso hidráulico desde captaciones situadas hasta cien kilómetros de distancia.

En el libro «De Aquaeductu Urbis Romae» FRONTINO describe su labor como administrador del abastecimiento entre los años 97 a 103 de nuestra era. De él no cabe deducir tampoco ningún razonamiento hidráulico: la sección transversal de los

acueductos viene sobredimensionada por razones de limpieza y vigilancia, y los cambios de pendiente no llevan aparejados cambios de sección.

También FRONTINO cree que el caudal es función sólo de la sección transversal, y que le basta con medir el calado para conocerlo. Como casi todos los acueductos de la época tienen pendientes similares, no yerra mucho al realizar esa hipótesis. Es verdad que hace la observación de que un cambio en la pendiente implica mayor velocidad y que eso obliga a hacer correcciones, pero no sabe cómo efectuarlas.

De hecho, cuando mide el agua en conducciones de menor pendiente nota que le falta líquido, e indignado lo atribuye a fugas y a robo de caudal. Cabe imaginar a más de un inocente en la cárcel acusado de un delito que ha sido cometido por la aceleración de la gravedad.

El capítulo del agua imaginada acaba de escribirse con los griegos y el flujo de ideas se mantiene estacionario hasta el Renacimiento. Por caprichos del destino el paso de ARQUÍMEDES por la vida no deja huella inmediata y es el pensamiento de ARISTÓTELES el que llena de errores el libro de la humanidad durante varios siglos. Los intelectuales siguen pensando que los cuerpos planos flotan mejor que los agudos, que estos se clavan en el agua, y que la flotación es mayor en aguas profundas que en las someras. En el gran cerebro, el sabio de Siracusa es una perturbación rápidamente amortiguada y que no altera el fluir de las mentes de la época.

El mismo SENECA opta por la visión Aristotélica del ciclo hidrológico y la redondea diciendo que no sólo el aire se convierte en agua, sino que es la misma tierra la que también lo hace. ¡Las cosas que dicen a veces los sabios!

Durante la edad media son los árabes los que apuntan un interés más notable por la ciencia y el conocimiento humano. La Biblioteca del califa de Bagdad recoge en 250.000 manuscritos todo el fondo del saber de la Grecia clásica. El Islam se llena de universidades: El Cairo, Túnez, Fez y Córdoba. Esta última reúne, en sus setenta bibliotecas, más de un millón de obras. Bajo el impulso califal la traducción del griego al árabe se convierte en un asunto de estado. Y, si bien hasta el siglo X el centro de gravedad de esta actividad se mantiene en el próximo oriente, a partir del siglo XI es el Al'andalus quien toma el testigo.

Los musulmanes no sólo son buenos traductores, sino que también hacen aportaciones y estudios originales. AVEMPACE (1140) es el primero que estudia el plano inclinado, AL-MUQQA ADASI precisa la noción de caudal y AL-ISTAKHI define la unidad de medida del caudal de un río como el número de molinos que es capaz de mover.

Sus hidráulicos siguen la tradición de desarrollar invenciones y artefactos, en lugar de avanzar en el conocimiento científico. En el siglo IX los tres hermanos BANU MUSA escriben un libro: KITAB AL-HIYAL, o «Tratado de los mecanismos ingeniosos», donde desarrollan artilugios hidráulicos de forma elegante. Son los primeros en aplicar el cigüeñal con bielas para accionar una válvula, convirtiendo el movimiento rectilíneo en giratorio, así como el conjunto piñón tornillo sin fin. También proyectan fuentes espectaculares, el sifón concéntrico doble, el depósito siempre lleno, la jarra que sirve a voluntad vino o agua, etc., etc.

La profesión de ingeniero hidráulico es por aquel entonces arriesgada. Los tres hermanos se encargan de construir un canal en el Tigris. Tienen un error de nivelación y el caudal aportado por la obra es inferior al previsto. El califa decide crucificarlos en las banquetas de la conducción. Solamente la muerte prematura del monarca los libra de semejante fin. Se rumorea, sin pruebas, que ellos tienen algo que ver con el magnicidio. Es probable que esa sea la razón de que, a lo largo de toda la historia, incluso en la actualidad, los gobernantes hayan mostrado siempre bastante desconfianza hacia los técnicos.

AL KHAZINI, en el Irán de 1120, aporta la noción de densidad de un fluido y su influencia sobre el movimiento de los sólidos. AL JAZARI publica en el medio oriente otro libro de mecanismos, con clepsidras, fuentes y diversas máquinas, así como aparatos para calibrar la hidráulica de una sangría. Es también un habilidoso artesano y fabrica autómatas inspirados en la escuela griega de Alejandría.

En cualquier caso, la humanidad sigue sumida en la oscuridad y salvo el brillante resplandor de ARQUÍMEDES, no se hará la luz hasta el renacimiento.

5. EL AGUA FORMULADA

Los ingenieros hidráulicos continúan durante toda la edad media realizando obras prodigiosas, apoyándose en la tradición artesanal de padres a hijos, con una correcta intuición de la fenomenología hidráulica que parte de la observación y de la experimentación, pero sin deducir de ella ninguna ley o principio, solamente el hecho de que los aparatos y las instalaciones funcionan.

Los artesanos trabajan controlando el agua, evitan los daños de las avenidas, desecan pantanos insalubres, abastecen a las ciudades, excavan canales para la navegación, instalan energía hidráulica en molinos, papeleras y laneras y construyen puertos.

Hay constancia de esclusas en la China del siglo séptimo, en la Holanda del catorce y en la Italia del quince. FILIPO DA MODENA instala en 1438 la esclusa Viarenna en Milán y su hijo FIORAVANTI no sólo sigue su oficio sino que, bendita falta de especialidad, construye la Catedral de la Asunción en el Kremlin.

Pero la humanidad ya está lista para dar un salto de gigante: el hombre inicia el desarrollo de unos conceptos abstractos que le permite comprender el porqué de los fenómenos hidráulicos, con ellos establece las variables que gobiernan el proceso y deduce unas ecuaciones que le sirven para justificar el comportamiento de la Naturaleza.

Este paso decisivo del saber dura cuatro siglos, apenas un breve lapso de tiempo en la larga presencia humana en la Tierra. Se produce una perturbación inicial en el fluir laminar de las ideas con el nacimiento de Leonardo de Vinci, y no es amortiguada: por el contrario, genera bifurcaciones sucesivas, con las inquietudes y aportaciones de otros hombres que van a su vez, perturbando a otros posteriores. Al final la turbulencia intelectual es generalizada y cientos de mentes van componiendo la imagen final del saber.

Parece un milagro que alguien deduzca de la observación natural, que ha permanecido millones de años ante los ojos ciegos de los hombres, la existencia de unas variables, idee un fluido ideal que se abstraiga de toda la complejidad de lo secundario, establezca unas leyes de comportamiento y las contraste con la experimentación.

Pero ese milagro se produce por una cascada, aparentemente caótica, de nombres y fechas, que descubren el caudal, la velocidad y la presión; conciben unos entes de razón denominados energía y cantidad de movimiento; deducen que deben conservarse a lo largo del espacio y del tiempo; elaboran unas ecuaciones que determinan esa conservación; detectan la presencia de la fricción y de la viscosidad; y formulan definitivamente el comportamiento del agua tanto a nivel diferencial como macroscópico.

Uno tras otro, todos los hombres que han ido generando la agitación del flujo de las ideas van conduciendo el pensamiento del gran cerebro de la humanidad hacia la culminación del conocimiento teórico en el siglo XIX.

El primero que utiliza las observaciones y los experimentos para formular leyes físicas del agua, y con él nace la moderna hidráulica, es LEONARDO (1452-1519). Uno de sus biográficos actuales es ENZO O. MACAGNO que sostiene en 1985, después de estudiar el Códice de Madrid y el Atlanticus, que el genio de todas las artes es más original en sus trabajos sobre fluidos que en el resto de las áreas, a pesar de los errores de bulto que comete.

En el Codex Hammer incluye, por primera vez en la historia, el principio de la continuidad. Afirma que a lo largo de una conducción el caudal permanece constante, y lo demuestra: *porque si una sección diera más que la previa, ésta quedaría seca*. En sus cuadernos redescubre el principio de HERÓN de que el caudal varía linealmente con la velocidad y, como consecuencia, ésta y el área son inversamente proporcionales.

En el Manuscrito de París lo argumenta diciendo que *«por eso el mar es más rápido en el Estrecho de España que en ningún otro sitio...»* y que *«si el orificio de descarga de una bomba es cien veces más pequeño que el pistón, entonces el agua irá cien veces más rápida que el embolo»*.

También de LEONARDO hay que extraer una lección de sus errores. Muchas veces la observación de los fenómenos nos puede inducir a engaño si admitimos el criterio de adoptar como cierto sólo lo que es aparente. Sobre esta reflexión habrá que volver con más detenimiento al hablar del agua simulada.

No conoce la presión, y se refiere a ella como potencia, relacionando su magnitud con la distancia a la que llega un chorro. Parece evidente que a mayor valor de la misma debe avanzar más. Pero eso no es cierto para un plano único. LEONARDO perfora un depósito con agujeros a distintas cotas, y observa lo lejos que llega el líquido a la altura de la base. Obviamente, el orificio inferior genera una trayectoria muy corta que alcanza enseguida a una superficie tan próxima; otros más altos progresan más. Con ese criterio, la relación presión profundidad es una errónea elipse de valor máximo a la mitad de la columna de agua.

Si hubiera realizado el experimento que dibuja, en el que clapetas a distintos niveles son sostenidas por pesos que cuelgan de poleas, hubiese obtenido por vez primera el empuje hidrostático. Pero no debe resultarle fácil la construcción de tal modelo y su determinación de la ley de presiones es falsa.

Aunque sabe de ARQUÍMEDES y de sus trabajos, no llega a disponer de ellos porque también yerra cuando supone que en el fondo de una vasija llena de líquido la presión es nula, en contra de lo que ya había definido con precisión el sabio de Siracusa. Para afirmar algo tan equivocado vuelve a basarse en una observación mal interpretada: ¡le parece que el agua quieta no pesa en el fondo, porque el lodo se mueve en ligeras olas como si fuera ingrávido!

LEONARDO, rey de la intuición, llena sus cuadernos con soluciones correctas y falsas para los mismos problemas: anticipa el principio de PASCAL en el Códice Hammer; justifica los vasos comunicantes y realiza los primeros apuntes sobre vórtices y olas; escribe y dibuja abundantemente sobre el movimiento del agua y otros fluidos, con una representación esencialmente cualitativa, pero tan precisa y correcta que sirve perfectamente hoy en día para ilustrar cualquier tratado de hidráulica; es consciente de la diferencia del movimiento irrotacional y rotacional, y que en el punto interno de un vórtice líquido la velocidad es mayor que en la periferia, justo al contrario que en una rueda; y también compara la propagación de las olas en la superficie del agua con la oscilación del trigo en el campo bajo el viento, intuyendo el papel del aire en el oleaje.

Pero su mayor mérito es el haber iniciado la observación y experimentación como base del razonamiento científico de la hidráulica. Es el padre de los modelos reducidos de lecho móvil y el primer diseñador de tanques con paredes de vidrio para observar los fenómenos físicos.

El Renacimiento significa, con LEONARDO, el despertar del cerebro de la humanidad tras un prolongado letargo. De forma espontánea, provoca la aparición de nuevas y sucesivas mentes aisladas que van añadiendo, imparablemente, nuevos conocimientos al saber general. En un símil hidráulico, él es el que inicia la transición del régimen laminar de las ideas al turbulento, generando inestabilidades en cascada que multiplican la aparición de turbulencias intelectuales.

Es BENEDETTI (1530-1590), matemático veneciano, el que, sin hablar de presión, la utiliza para razonar el equilibrio de los vasos comunicantes introduciendo no sólo el concepto de peso vertical sino también el de empuje horizontal, que aparece por primera vez en el conocimiento del hombre.

Casi simultáneamente, la idea de empuje hidrostático se incorpora gracias a STEVIN (1548-1620), ingeniero alemán que calcula la presión sobre una pared utilizando herramientas de cálculo infinitesimal y de límite. Demuestra que sigue una ley triangular y admite, sin decirlo, que la horizontal es igual a la vertical.

Poco después aparece el gran GALILEO (1564-1642), que inicia, indirectamente, una nueva ruta en el planteamiento de la hidráulica: pone de manifiesto la autonomía de la ciencia, establece el método experimental y resuelve el problema del movimiento, la caída de los cuerpos y la trayectoria parabólica.

Cuando aborda en 1612 la demostración del equilibrio de los vasos comunicantes realiza la primera formulación del principio de los trabajos virtuales: «*Pesos distintos se contrabalancean y adquieren igual momento cada vez que sus gravedades se emparejan con inversa proporción a sus velocidades*».

A pesar de que ya se ha iniciado el imparable camino del conocimiento intelectual, los artesanos siguen superando a los científicos. Aún a finales de este siglo XVI y en los umbrales del esplendoroso XVII, no deja de sorprender la profunda dicotomía existente entre ciencia y técnica. No se sabe apenas nada de la hidráulica, ni siquiera existe el concepto de presión en el interior de un conducto y sin embargo se hacen prodigiosas obras de ingeniería del agua, muy similares a las actuales.

Un carpintero de ribera, natural de Baviera, SIMON REIFFENSTUEL, marcha a Lyon para aprender un nuevo concepto de bomba: la que impulsa directamente a una tubería a presión. Para abastecer el castillo del duque en Munich, construye en 1607 una de acero de tres etapas; la mueve con la energía fluente del río mediante una rueda hidráulica; y eleva cuatro metros cúbicos a la hora a más de doscientos metros de altura y treinta kilómetros de distancia, gracias a una tubería de plomo de noventa y cinco milímetros de diámetro. La instalación, plenamente actual, cuenta con todos los conceptos hidráulicos vigentes hoy en día: siete escalones de impulsión, cámaras de rotura de carga, perfil piezométrico correcto y una durabilidad superior a los doscientos años. Es imposible que este hombre no conozca los principios de la hidráulica, pero nunca piensa en escribirlos, razonarlos como un científico ni divulgarlos. Su obra es su única y maravillosa forma de expresión.

Este hito marca el principio de un siglo que, desde nuestro punto de vista del líquido elemento, va a tener dos mitades netamente diferentes: una primera, en la que se desarrolla la hidrostática y se producen las grandes reflexiones sobre el vacío y la presión atmosférica; y una segunda, increíblemente más eficaz, donde apenas se habla de agua, en la que se sientan las bases de la mecánica y la matemática moderna y, además, se crean las academias.

CASTELLI es un discípulo de GALILEO que se equivoca en 1628 a la hora de evaluar la velocidad de descarga de un depósito por un orificio. Sin embargo, va a pasar a la historia por inventar la ventosa. Escribe con rigor científico el famoso principio de continuidad, dando lugar a una polémica sobre si lo ha copiado de LEONARDO o, por el contrario, es el dominico ARCONATTI, recopilador de las obras del genio DA VINCI, el que recoge en ellas sus argumentos.

Hay una frase lapidaria que se encuentra con frecuencia en los textos de la edad Media: *La naturaleza tiene horror al vacío*. Es un axioma que nadie explica pero que inunda la filosofía y la religión, siendo considerado casi materia prohibida por la Iglesia. Probablemente sea ARISTOTELES el culpable, con su desafortunada influencia en muchos de esos pensamientos erróneos.

Un científico aficionado de Génova, GIOVANNI BATTISTA BALIANI (1582-1666) se cartea con GALILEO y le plantea que por qué los sifones no funcionan por encima de los diez metros de carga. También le hace la observación de la brusca rotura de la columna de agua y apunta que ahí se debe producir el tan denostado vacío.

GALILEO le responde como un especialista en estructuras: el hilo de agua alcanza su carga de rotura y se rompe, simplemente. Pero BALIANI, en una carta del 24 de Octubre de 1630, concluye que todos estos fenómenos se deben a la presión atmosférica. Hay que hacer notar que hasta el gran DESCARTES se opone frontalmente al vacío y justifica el límite de aspiración de las bombas porque están mal construidas.

En 1608 nace el fundador de lo que será cien años después la hidrodinámica: TORRICELLI. Alumno de GALILEO, profundiza en el estudio de los cuerpos que caen y en el movimiento de proyectiles. Los asimila a las gotas de un fluido y enuncia su teorema: *«La velocidad de un chorro a la salida es igual a la de una gota cayendo en el aire desde el nivel del fluido hasta el orificio»*. De ahí señala que esa velocidad no es proporcional a la altura sino a su raíz cuadrada, corrigiendo el error que cometió CASTELLI en su obra póstuma.

TORRICELLI escribe en 1641 toda su aportación a la hidráulica en veinticuatro páginas y muere, seis años después, sin publicarlas. Los herederos tiran sus papeles, y sus manuscritos aparecen milagrosamente en 1750 envolviendo un salami que un matemático florentino acaba de comprar en una charcutería. Se lleva a la tumba el secreto de la fabricación de lentes para telescopios y microscopios, que no ha compartido con nadie, tras medir la presión atmosférica con su famoso manómetro de mercurio, y demostrar (1644) que el vacío no hace fuerza atractiva, porque tubos con distintos volúmenes huecos alcanzan idéntica altura de líquido. Ha intentado comprobar además si lo que queda en lo alto de sus tubos es vacío o simplemente aire enrarecido, utilizando una campanilla que debe sonar sin transmitir el sonido, pero fracasa.

Ladrillo a ladrillo, célula a célula, el gran cerebro va construyendo una idea del comportamiento real del agua. Ya sabe bien lo que es caudal, pero para que conozca definitivamente la segunda variable del proceso hace falta que nazca PASCAL en 1623. Con 24 años, inventa la prensa hidráulica y define la presión actuando igual en todas direcciones. Le da valor al módulo, aunque aún ignora su carácter vectorial normal a la superficie. En 1654 presenta *«Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse d'air»* donde afirma lo que ya había intuido veinticinco años antes BALIANI y escrito hacía tres TORRICELLI: *«La pesanteur de la masse d'air produit tous les effets q'on a jusqu'ici attribues a l'horreur du vide»*.

Cuando acaba la primera mitad del XVII ya están definidos la velocidad, el caudal y la presión, pero falta la matemática suficiente para desarrollar la hidráulica. Es precisamente en ese momento cuando, simultáneamente, nacen dos de las cabezas más importantes de la humanidad NEWTON en 1643 y LEIBNITZ en 1646. ¿Significan también mutaciones genéticas que alteran por bifurcación el curso de los acontecimientos, o son un producto lógico de la evolución del gran cerebro?

Paradójicamente, ninguno de los dos es un buen hidráulico. Las aproximaciones de NEWTON a las líneas de corriente, a los chorros y a los cuerpos obstaculizando el paso de un fluido son confusas cuando no equivocadas. Y LEIBNITZ no se interesa por el mundo fluido. Sin embargo, el conocimiento del agua actual no sería el que es si ambos no hubiesen nacido.

LEIBNITZ es el padre del cálculo infinitesimal (se anticipa a NEWTON en tres años) y también es el iniciador de la matemática moderna. Introduce el principio de causalidad, sobre el que hay planteada hoy en día la gran discusión de los conceptos deterministas y caóticos, y sobre el que habrá que volver más adelante. Mantiene una interesante correspondencia con DESCARTES sobre el primer concepto de energía cinética (una *vis viva* que genera trabajo) y elabora su famosa Monadología, que ha generado tanta controversia, no poca incredulidad y alguna decepción para los admiradores de una mente prodigiosa que no acaban de entender una idea aparentemente tan frívola.

NEWTON es el padre de la mecánica racional. Publica «Principia» en 1687, en el que se sientan las bases de la gravedad, del choque de sólidos y de los principios de la mecánica. Es especialmente importante para el agua simulada su enunciado de la segunda ley del movimiento: *«El cambio en movimiento es proporcional a la fuerza impulsora y es hecho en la línea recta en la que esa fuerza actúa»*.

Esta ley está formulada bajo la concepción de lo discontinuo, no contiene el tiempo como una variable explícita y es imposible utilizarla de forma continua en derivadas parciales para fenómenos en los que el flujo varía rápidamente y el proceso es irreversible. Ella será la base futura de la matemática del discreto, aplicada a la simulación en la hidráulica computacional, y permitirá un desarrollo que sería inviable desde la perspectiva del continuo. NEWTON formula la ley de forma discreta para aplicarla a problemas de impacto y es más tarde cuando la extiende al movimiento continuo, introduciendo el tiempo en sus definiciones.

A mediados del XVII los poderes políticos toman conciencia de que la ciencia puede favorecer el desarrollo económico y deciden sacarla del ámbito religioso. En 1657 el Príncipe LEOPOLDO DE MEDICIS funda la Academia del Cimento; en 1662 se crea la Royal Society of London; en 1666 nace la Academia de Ciencias de París bajo los auspicios de COLBERT, ministro de Luis XIV; y, algo después, en 1700, la de Berlín y en 1725, la de San Petersburgo.

Todo está casi dispuesto para la explosión científica del XVIII. Falta que GUGLIELMI (1655-1710) de Bolonia haga la primera reflexión sobre el agua real, muy lejos de las especulaciones de la mecánica de fluidos ideal: la lluvia es variable, la erosión modifica los cauces, el hombre altera la naturaleza, las conducciones ofrecen resistencia y existe un equilibrio dinámico. Pone un toque de alerta para que se derive la atención científica hacia la problemática con la que los ingenieros llevan milenios trabajando.

Y también se necesita que, paradójica y simultáneamente, ZENDRINI cierre el siglo XVII en Venecia con un libro en el que trata los fenómenos del agua por medio del análisis matemático. El autor se justifica en el prólogo, por si alguien se sorprende de ver el álgebra aplicada al agua, pero la geometría es la base de la ciencia en lo que respecta al peso, movimiento y fuerza, y de ahora en adelante tendrá que ser la herramienta insustituible que ocupe el lugar del tratamiento meramente cualitativo que la había precedido.

Es en la primera mitad del siglo XVIII cuando la concepción física de la hidráulica pega un salto de gigante gracias a la aportación de tres personajes que viven y trabajan juntos protagonizando un extraño drama personal más propio de una obra de teatro que de la vida real. Se trata de los BERNOUILLI y de EULER.

JEAN BERNOUILLI nace en 1667 en BASILEA y en sus genes lleva escrito un intenso amor por la Matemática y un carácter difícil. Se pelea con su padre Nicolás porque no quiere ser mercader. Acepta como concesión provisional estudiar medicina, pero está dispuesto a no ejercer y dedicarse sólo a su auténtica vocación. Su hermano Jacob, trece años mayor que él, también matemático a pesar de su progenitor, es su tutor en cálculos y especulaciones.

En 1684 conoce el nacimiento del cálculo infinitesimal de LEIBNITZ y, aunque comienza por no entenderlo, como casi nadie en esa época, descubre su enorme potencia gracias a las explicaciones de Jacob. Escribe a su enunciador, y lo asaeata a cartas hasta que, al fin, consigue la mayor ilusión de su vida: recibir una respuesta. A partir de ese momento, en el que inicia una fértil correspondencia con el gran filósofo, se convierte en un fervoroso partidario del padre de la matemática moderna y, como contrapartida, en un acérrimo crítico de su rival inglés: NEWTON.

Jacob emplea el recién aprendido cálculo infinitesimal en muchas áreas de la física. Pasará a la historia de la ciencia por su aportación a las estructuras, al plantear la flexión, los primeros análisis del pandeo y el principio de conservación de la energía. Consigue la plaza de profesor de matemáticas en la universidad de Basilea mientras que Jean marcha a París a vivir bajo la agria tutela de otro gran matemático: L'HOSPITAL.

Cansado del maltrato que recibe del francés, intenta volver y aspira a lograr otro empleo docente en su ciudad natal. Sorprendentemente Jacob, celoso de la brillantez de su hermano, intriga para que lo rechacen. Y el joven tiene que irse de profesor a Gronnigen donde permanecerá hasta 1706 en que, muerto Jacob de tuberculosis, volverá a ocupar la plaza de matemáticas que había ostentado su hermano. Esos años han estado caracterizados por un odio fraternal, que es bien conocido en Europa, y que ellos se han encargado de pregonar en todos los ámbitos científicos.

Jean tiene varios hijos. En 1700 le nace el tercero, Daniel, al que tampoco quiere como matemático sino como mercader, repitiendo increíblemente la historia de su infancia y acentuándola porque, encima, pretende casarlo a la fuerza con una rica y fea heredera.

Daniel, a hurtadillas, también estudia matemáticas gracias a la ayuda de su hermano mayor Nicolás. Lee a NEWTON y, aún a sabiendas de la aversión de su padre por el inglés, lo adopta como ídolo. El agua y el aire lo atraen mágicamente, y decide que quiere ser en el siglo XVIII para los fluidos lo que NEWTON ha sido en el XVII para los sólidos.

Acepta ser médico, cediendo a la tensión permanente con su progenitor, pero lo hace bajo la óptica de su obsesión personal: la mecánica de fluidos. Se interesa y trabaja en los temas de la circulación de la sangre y del papel que juega el aire en la respiración. Intenta con veintiún años conseguir un nombramiento de profesor, pero

la historia reincide: por aquel entonces Jean, que está encandilado con un nuevo alumno del que espera las cosas más importantes, LEONHARD EULER, siete años más joven que Daniel, no presta la menor ayuda a su hijo. Este no consigue la plaza y, cuatro años más tarde, es llamado por Catalina la Grande para convertirse en el profesor de matemáticas de la Academia de Ciencias de S. Petersburgo.

El largo viaje, cruzando Europa, lo realiza ilusionado con su hermano mayor y tutor Nicolás que, afectado por un lugar tan frío, oscuro e inhóspito, muere de tuberculosis al año siguiente. Daniel, que se siente solo, convence a EULER para que vaya a trabajar con él. De esa convivencia nace la más rica fertilidad de ideas: EULER siempre encerrado con papeles y planos y DANIEL BERNOUILLI experimentando en laboratorio.

En Rusia, los logros del joven BERNOUILLI lo catapultan a la fama. Mide la presión sanguínea e intuye los principios de la conservación energética en el agua. En 1732 consigue su sueño dorado, volver como profesor a Basilea donde es recibido en olor de multitudes por todos menos por su padre, con el que discutirá terriblemente dos años después. El viejo profesor no soportará compartir su premio de la Academia de París con un hijo que pretende, nada más ni nada menos, que estar a su nivel.

Daniel publica en 1738 un libro denominado «Hidrodinámica». Es la primera vez que aparece el término y por tanto es suya la paternidad. En él, extrapola el concepto de energía cinética de LEIBNITZ a los fluidos y establece, indirectamente, el principio de conservación de la suma de la altura y del cuadrado de la velocidad debidamente ponderado.

Orgulloso del mismo, convencido de su importancia, satisfecho porque ya cree ser a la hidráulica lo que NEWTON a la mecánica, le envía su libro a EULER. Curiosamente el original se pierde y tarda dos años en llegar; lo hace a la vez que un manuscrito que ha escrito su padre sobre «Hidráulica». EULER lee ambos, los juzga y se inclina por la formulación paterna, que establece claramente el concepto de presión, introduce la densidad, y plantea la ecuación de conservación en los términos que hoy conocemos. Jean publica su libro en 1742, pero con fecha de 1732 para que parezca anterior al de Daniel que, indignado, acusa a su padre de plagio. EULER afirma que puede que sea una copia, pero que mejora notablemente el original.

La historia atribuye a DANIEL BERNOUILLI la ecuación de equilibrio piezométrico, pero realmente la correcta formulación es hecha por un Jean, insostenible, que no se lleva bien con su hermano ni con su hijo y que adora con devoción al gran hombre de la hidráulica del siglo XVIII: EULER.

LEONHARD EULER, ha hecho un acuerdo tácito con Daniel para no escribir sobre hidráulica hasta que éste publique su libro. Por eso sus aportaciones iniciales se reducen a la correspondencia con los BERNOUILLI y a la ayuda que, sin duda, les ha proporcionado para sus publicaciones. Una vez muerto Jean, se siente libre de participar en el mundo fluido y publica en 1749 su «Ciencia naval», donde dice por primera vez que la presión actúa normal a la superficie y que es igual en cualquier dirección.

Su máxima aportación a la mecánica es la formulación diferencial y continua del segundo principio de NEWTON. Con ella, describe el movimiento de un cuerpo sólido e introduce el principio del corte y equilibrio. Supera el concepto unidimensional de la tubería y comienza a considerar el fluido como un medio continuo en el que, en cada punto y dirección, están relacionadas la velocidad y la presión.

En 1755 publica en Berlín sus «Principios generales del movimiento de los fluidos» y allí van incluidas sus famosas ecuaciones diferenciales: la de equilibrio dinámico en el espacio y la de continuidad de fluidos compresibles e incompresibles. Esas ecuaciones producen hoy en día el mismo asombro y respeto que le infunden a su propio autor cuando afirma que, a partir de ese momento, las dificultades ya no están del lado de la mecánica sino de la analítica, anticipando que hasta que no llegue un computador capaz de resolver ese sistema no se podrá simular la realidad.

TRUESDELL (1972) dice de ellas que son la primera formulación de un aspecto del mundo de la percepción usando un modelo del continuo, establecen el concepto de fluido ideal y dan a luz a una nueva rama del cálculo: las derivadas parciales.

Esas ecuaciones son casi perfectas. Sólo carecen del término de la fricción que, aunque buscado por EULER en 1761 y 1763, no será encontrado hasta el siglo XIX. Lo más sorprendente de todo es la limitación que acompaña a este gran científico, el mejor del siglo XVIII, a lo largo de su vida: una congestión cerebral le hace perder un ojo a la edad de treinta y un años y una catarata lo deja prácticamente ciego a los sesenta y cuatro. Aún así continúa trabajando, ayudado por sus hijos, hasta que fallece doce años después.

Su producción es enorme. Con él, cabe destacar algo que se va a repetir con frecuencia en los años sucesivos: los hombres que trabajan en hidráulica también lo hacen intensamente en el cálculo de estructuras. EULER plantea las ecuaciones diferenciales de los problemas elásticos; es el padre del principio de superposición; establece el cálculo del pandeo de columnas y desarrolla la teoría de vibraciones.

El ISAAC NEWTON de la hidráulica del siglo XVIII no es el desgraciado DANIEL BERNOULLI sino su amigo y, sin pretenderlo, rival LEONHARD EULER.

Otro estructuralista aficionado a la hidráulica es el Marqués de POLENI (1683-1761). Profesor de astronomía en Padua a los 25 años, inspecciona la cúpula de San Pedro de Roma, y en sus estudios encuentra la cubierta laminar de igual tensión. Abandona el mundo estructural para dedicarse al del agua, y no sólo se convierte en un experto en la defensa de cursos hidráulicos sino que instala un laboratorio importante en su universidad, donde experimenta el perfil de chorros de desagüe en descarga libre y sumergidos, estudiando el coeficiente de contracción y el caudal. Las fórmulas que obtiene, y que conservan su nombre, son confirmadas por la experiencia. Una muestra de su ingenio, y de su carácter, viene dada por el hecho de que inventa una máquina de calcular y la destruye al saber que en Viena hay otra más perfecta.

Un foco importante del saber hidráulico se desarrolla en París a lo largo del siglo XVIII. Apoyándose en la Academia, una serie de hombres se encarga de ir sen-

tando las bases de la hidráulica real en torno a tres temas: el desagüe de depósitos, las conducciones a presión y el régimen libre en canales. En 1747 se funda la Ecole National de Ponts et Chaussées, que no sólo forma ingenieros sino que da un empuje increíble a la investigación y al conocimiento.

D'ALEMBERT (1718), es quizás la figura más relevante de esa época gracias a la publicación de la Enciclopedia junto a DIDEROT, con el que, por cierto, no se lleva especialmente bien. Además de ser un gran científico, posee una gran categoría humana, puesta de manifiesto por las circunstancias de su vida: lo abandona su madre ante una iglesia a los pocos días de nacer, y lo recoge un modesto vidriero, al que permanece unido mientras vive renunciando a los boatos y a las prebendas a las que su pronta fama le dan derecho.

En 1752, tres años antes que EULER, publica las ecuaciones en derivadas parciales para los fluidos, pero lo hace de forma menos clara y elegante. Discute el empuje del flujo de corriente sobre sólidos sumergidos pero ignora la importante influencia del agua abajo. Su intervención más popular en hidráulica es conocida como la «paradoja de D'Alembert»: *un fluido perfecto, bajo ciertas condiciones, no encuentra resistencia alguna en un sólido sumergido inmóvil*. Evidentemente la experiencia dice lo contrario, lo que se explica por la diferencia entre fluidos perfectos y reales y la existencia de la viscosidad, extraña para el físico francés pero una de las variables más importantes, a la que, por fin, le va a llegar la hora de encontrar un lugar en el gran cerebro de la humanidad.

La segunda mitad del siglo XVIII se caracteriza por la aparición de un nuevo protagonista que está presente en la hidráulica real pero no en la teórica: la fricción. En 1749 un holandés, VELSEN, enuncia que la pérdida de carga es proporcional a la longitud del trayecto y al cuadrado de la velocidad; el alemán BRAHMS confirma esa afirmación y le añade la superficie mojada sobre la longitud considerada, lo que en tubos circulares implica incluir el diámetro.

CHEZY (1717-1798) es un ingeniero experto en puentes que interviene en muchos de ellos a las órdenes de PERRONET, el primer director de la Escuela de Ingenieros. Se especializa posteriormente en hidráulica para dedicarse a proyectar y construir canales. La vida del proyectista consultor también es azarosa en ese cuarto de hora de la Historia y pasa por una época en la que la falta de encargos lo lleva a la miseria. Afortunadamente puede reponerse económicamente y acaba siendo a su vez director de Pont et Chaussées.

En 1768 enuncia su famosa fórmula del flujo en canales, en la que aparece el concepto de radio hidráulico. La especulación en torno al difícil parámetro de la rugosidad hace que, a partir de esa ecuación, todos los ingenieros sueñen con saltar a la fama proponiendo una nueva expresión para la pérdida de carga en conducciones abiertas.

BORDA (1732-1799) también consigue legar una fórmula para la posteridad. Ingeniero naval, preocupado por el efecto del rozamiento en la velocidad de los navíos lo estudia teóricamente. Aplicando el principio del choque elástico de sólidos (lo que escandaliza a D'Alembert) determina la pérdida de carga en un cambio brus-

co de sección. Como todos los científicos de la época, tampoco acierta con el coeficiente de desagüe de un orificio en descarga libre.

El abad BOSSUT publica en 1772 un tratado teórico y experimental de la hidrodinámica en el que habla del rozamiento como regulador de la velocidad en tubos. También deduce que, en canales, la fricción anula la aceleración provocada por la pérdida de altura, lo que mantiene la velocidad constante. Sostiene como método científico el establecimiento previo de fórmulas basadas en consideraciones teóricas que después se deben comprobar experimentalmente. Pero no es capaz de medir la velocidad en conducciones en lámina libre ni ajustar sus desagües de orificios, para los que se tiene que conformar con nomogramas obtenidos prácticamente.

Por fin, es el abad italiano VENTURI el primero que escribe sobre viscosidad. Instala un laboratorio en Modena con artilugios heredados de POLENI. Allí observa que la trayectoria de un chorro que atraviesa un depósito arrastra a las partículas laterales que están en reposo. A ese efecto lo denomina «comunicación lateral» y le dedica toda una publicación en 1797. Estudia el coeficiente de desagüe en orificios y aclara por qué se equivocan NEWTON, D'ALEMBERT y todos los demás: no bastan las leyes de la mecánica para evaluarlo, hay que incluir la viscosidad. No sólo es inductora de rozamientos sino también de torbellinos.

Paradójicamente no es el autor del caudalímetro que lleva su nombre. Este es inventado en 1877 por el inglés HERSCHELL, a partir de los principios obtenidos por el italiano. Bien nacido, lo bautiza con el nombre del investigador.

El siglo XVIII ha supuesto un salto gigantesco para la hidráulica: se han abierto los grandes frentes, se conocen las variables, se ha desarrollado la formulación diferencial y se empieza a disponer de las herramientas experimentales. Será en el XIX cuando la ciencia del agua explote. Ya no será tan fácil seguirle la pista. En el gigantesco cerebro de la humanidad no serán sólo algunas neuronas aisladas las que vayan escribiendo el nuevo conocimiento, sino que esa tarea se extenderá exponencialmente a lo largo de todo el orbe civilizado. La turbulencia es generalizada y las bifurcaciones inestables se suceden en cascada.

En este nuevo siglo se van a producir dos hechos en paralelo: se completará la formulación hidráulica, cerrando ese capítulo que hemos mencionado como el agua formulada, y comenzará otro no menos importante: el agua modelada. No existe un hecho puntual como fue el nacimiento de LEONARDO, sino una transición suave que lleva a una coexistencia de los dos mundos científicos: el que culmina cuatrocientos años de trayectoria y el que durará unos cien.

La formulación definitiva del comportamiento de un fluido como un medio continuo va a corresponder a los expertos en mecánica del sólido: los profesores franceses dedicados al mundo de la Resistencia de Materiales. Resulta reconfortante, para un catedrático de estructuras que prepara discursos sobre el agua, comprobar cómo la mayor aportación al tratamiento matemático de la hidráulica ha venido de la mano de estructuralistas.

NAVIER (1785-1836) es profesor de mecánica y más tarde director de Pont e Chaussées. Fundador de la Resistencia de Materiales, elabora una teoría de la elasti-

cidad basada en un solo parámetro para la ecuación constitutiva del material. Proyectista de estructuras, escribe un tratado de puentes colgantes que presenta a la Academia de Ciencias en 1823. Su viaducto más famoso, sobre el Sena frente a la explanada de los Inválidos, tiene que ser demolido antes de su inauguración por una cimentación defectuosa de los anclajes.

Se podría pensar que es esa triste experiencia la que lo arroja en brazos de la hidráulica, pero no es así: cinco años antes, en 1821, hace su genial aportación a la mecánica de fluidos. Es consciente de que EULER ha planteado sus ecuaciones diferenciales bajo la hipótesis de que las partículas de fluido son capaces de moverse libremente, con independencia unas de otras. No pueden, por tanto, ser aplicadas a los líquidos viscosos. NAVIER comprueba experimentalmente que la viscosidad depende de la velocidad y añade un término binómico a las ecuaciones de EULER, suponiendo que la atracción molecular es proporcional a la diferencia de sus velocidades.

Otro profesor de la Escuela, DENIS POISSON (1781-1840), tiene una obra inmensa en la que toca desde la mecánica celeste hasta el magnetismo, pasando por la estadística. En todas esas especialidades ha dejado leyes o ecuaciones que llevan su nombre, y es considerado el creador de la física matemática. En elasticidad da su apellido al segundo parámetro constitutivo al que NAVIER ha sido ajeno: el coeficiente de deformación transversal bajo tensión normal. Trata el movimiento de fluidos viscosos bajo la óptica del cálculo estructural. Piensa que es una variante de la teoría de la elasticidad de los sólidos y llega en 1830 a las mismas ecuaciones que su colega NAVIER.

BARRÉ, CONDE DE ST. VENANT (1797-1886), ingeniero de Ponts et Chaussées y también profesor de esa escuela, aporta a la Resistencia de Materiales su famoso principio con el que pone de manifiesto que las tensiones a cierta distancia del borde son idénticas para fuerzas equivalentes aplicadas en el mismo. Trata la mecánica de fluidos bajo dos escalas distintas:

- En la de medios continuos introduce el concepto de que la presión no es normal a la superficie de contacto en líquidos viscosos. Supone que la componente tangencial de la misma es proporcional a la velocidad y vuelve a obtener las ecuaciones de NAVIER, que se ven así consagradas.
- En una dimensión superior aborda el comportamiento del agua en canales abiertos a escala de sección completa. Es el descubridor de la pendiente crítica que separa el régimen lento (*écoulement de riviere*) y el rápido (*écoulement de torrent*). Establece la ecuación diferencial de la continuidad para el flujo no permanente, que unida a la de conservación de la cantidad de movimiento para conducciones de régimen libre, proporcionan el sistema que rige el comportamiento no estacionario en canales y que lleva su nombre. Si se enlaza con la de equilibrio dinámico en tuberías se genera la pareja de ecuaciones que regula los transitorios en conducciones cerradas y que también ostenta su apellido. Probablemente al hacerlo no sea consciente de que

está definiendo las leyes de una estructura macroscópica que se desarrolla en un plano más elevado que el de la partícula del continuo, que se gobierna a su vez por las ecuaciones de NAVIER.

Con ST. VENANT queda plenamente formulado el comportamiento del agua en ríos, canales y tuberías. Solamente retoques a la hora de incluir y evaluar el término de fricción, y los distintos intentos de integración, constituirán la tarea pendiente.

Un inglés, GEORGE STOKES (1819-1903), profesor de Cambridge, al que no se le conocen veleidades en el mundo de las estructuras, formula bajo una concepción euleriana de los ejes las ecuaciones del movimiento viscoso suponiendo que las presiones tangenciales son proporcionales a las velocidades. Sus ecuaciones, mucho más cómodas que las de NAVIER, vienen a ratificar los tres puntos de vista anteriores.

Esas ecuaciones, adaptadas a la nomenclatura moderna, son conocidas en el mundo científico como las de NAVIER-STOKES y ponen el punto final a la formulación de la mecánica de fluidos. En 1851 el agua ya ha sido formulada. Y, sin embargo, no ha sido vencida. No basta con poder expresar su comportamiento por medio de ecuaciones diferenciales si éstas no son integrables. Una dura tarea queda por delante del mundo científico y técnico: resolver simplificando, modelando y observando toda la enorme casuística que el agua ofrece.

El siglo XIX marca también otro hito importante: el nacimiento de la hidrología como ciencia que pretende formular el agua procedente de las precipitaciones.

Irlanda tiene una grave complicación con el drenaje. Las colinas están en la costa y dificultan el desagüe de la llanura central. La precipitación es elevada y las retenciones de caudales provocan sedimentaciones que acentúan el problema: se producen frecuentes inundaciones. Para facilitar la navegación interior, evacuar las crecidas y drenar las tierras los ingenieros irlandeses inician una seria y eficaz tarea para el conocimiento del comportamiento hidrológico de su país.

WILLIAMS MULVANY (1806-1885) hace en 1845 la primera estimación de un caudal de avenida. Mide los incrementos de nivel de un lago, evalúa el volumen de la riada, lo compara con el área de la cuenca y, suponiendo la lluvia de veinticuatro horas, que también mide, determina por primera vez el coeficiente de escorrentía. Admite que es constante para todo el año y que es una medida de la evaporación y la infiltración.

A partir de entonces, todos los ingenieros irlandeses que trabajan en las obras de drenaje se dedican a medir y a evaluar caudales de crecida. Para ello llegan a construir más de cien estaciones de aforo.

MANNING (1816-1897) famoso por su fórmula, que relaciona la capacidad de desagüe con la rugosidad y que es, sin duda, la más empleada hoy en la ingeniería práctica, publica en 1851 su tratado de Hidráulica. En él incluye una serie de reflexiones sobre el método de MULVANY: el coeficiente de escorrentía en tormentas no puede depender de la evaporación, que es nula mientras llueve, ni de la infiltración una vez que el suelo está saturado. Y marca la importancia de la forma y pendiente

de la cuenca. Comete el error de seguir utilizando la precipitación de un día. Afirma que la extrapolación de series históricas es un mal método si se hacen obras de drenaje, porque las condiciones de desagüe varían y la riada puede ser mayor. Recomendaba tomar datos de cuencas con obras similares.

Pero la perturbación clave para agitar el flujo de ideas del mundo de la hidrología es JOHN MULVANY (1821-1892), hijo de William y padre del llamado método racional para el cálculo de hidrogramas de avenida. En 1851 presenta una comunicación al Instituto de Ingenieros Civiles de Irlanda sobre las relaciones entre la precipitación y el caudal de crecida de una cuenca dada. Señala la importancia del aumento de la intensidad de lluvia en períodos inferiores a un día; define el tiempo de concentración por primera vez en la historia y discute el coeficiente de escorrentía en función de la geología, cultivos, etc. Inventa el medidor de caudal gráfico de banda de papel, para situar sobre los vertederos en la estaciones de aforo, como única herramienta capaz de evaluar correctamente los hidrogramas. Con él desaparece la norma errónea de suponer un caudal de proyecto fijo en pies cúbicos por acre y minuto para cualquier cuenca.

Durante el XIX otros nombres hacen aportaciones a la formulación del agua: DARCY (1803-1838) estudia y evalúa el efecto de la rugosidad de las paredes de los tubos; BAZIN (1829-1917) lo hace con los cajeros de los canales; CAUCHY (1789-1857) desarrolla la teoría de las ondas; LORD KELVIN (1824-1907) analiza el flujo rotacional propio de la turbulencia y las leyes que rigen las mareas; AIRY publica en 1845 su estudio de celeridad de onda afectando a olas y mareas; y en Rusia, JOUKOWSKY (1847-1921), más aeronáutico que hidráulico, soporte de la aviación rusa, estudia la resistencia a la penetración de los fluidos y aborda los fenómenos transitorios en tuberías.

El capítulo del agua formulada llena de satisfacción a los científicos porque, en opinión de todos, ya se conoce la verdad. Pero los ingenieros se preguntan que dónde está esa verdad: hay planteadas unas ecuaciones diferenciales que no son integrables y que hablan de un fluido ideal, en conductos perfectos y con condiciones de contorno teóricas, pero sirven de muy poco para los problemas cotidianos.

El mundo real del agua sigue siendo un desconocido y los técnicos continúan utilizando el oficio aprendido, la prueba y error y la intuición. Como la humanidad quiere conocer sus secretos, ha descubierto la caja donde se guardan, pero no dispone de la llave para abrirla, no tiene otro remedio que cerrar este capítulo y abrir uno nuevo.

6. EL AGUA MODELADA

Es en Inglaterra donde comienza a escribirse el siguiente capítulo del conocimiento humano que nos ocupa: el agua modelada. En el siglo XIX, en las islas británicas hay una intensa actividad industrial y empresarial que es el motor de la investigación aplicada. Casi todos los descubrimientos son realizados bajo la óptica

de resolver un caso práctico y, en su mayor parte, propiciados y financiados por empresarios.

El pionero de la modelización es FROUDE (1810-1879), que trabaja en los barcos de vapor y estudia sus características aerodinámicas y la de sus hélices. Observa que, cuando la velocidad del navío coincide con la celeridad de las olas, se genera bruscamente una onda amplificada que lo frena. Para poder experimentar más cómodamente, construye modelos reducidos y prototipos, para los que desarrolla un sin fin de instrumentos de medida. Se plantea la validez de la extrapolación de los resultados allí obtenidos a los casos reales y en 1868 enuncia su ley de semejanza que abre la puerta al agua modelada. El número de FROUDE no sólo permite cambiar la escala entre un modelo y la realidad, sino que viene a evaluar los tipos de régimen lento o rápido, señalados por ST. VENANT, y mide una relación entre la velocidad del agua y la celeridad de las ondas.

Si dos sistemas están representados por las mismas ecuaciones y tienen idénticas condiciones de contorno se dice que son semejantes. Sus ecuaciones se pueden expresar en términos adimensionales de masa, longitud y tiempo. Los coeficientes adimensionales son denominados parámetros de semejanza y pueden adoptar valores numéricos diferentes para distintos problemas, de acuerdo con sus propiedades. Si en dos sistemas son iguales, las ecuaciones resultan idénticas y su solución, adimensional, también. El comportamiento evaluado de un modelo reducido es válido para todos sus semejantes, es decir, los reales que tengan idénticos parámetros.

Se acaba de abrir una puerta espectacular que permite soslayar la inintegrabilidad de las ecuaciones de NAVIER-STOKES. Construyendo modelos físicos, a escala manejable, que reproduzcan la fenomenología que se busca, se puede estimar el resultado real sin más que mantener los parámetros de semejanza. Esa salida al problema es, a partir de ese momento, utilizada con profusión.

OSBORNE REYNOLDS (1842-1912) trabaja con FROUDE en la Asociación británica para el progreso de la ciencia. Pronto cambia su interés por los barcos y sus motores a los modelos reducidos de lecho móvil que reproducen mareas y estuarios. Utiliza colorantes y observa en tubos transparentes la influencia de la velocidad en las trayectorias de los filetes líquidos. Encuentra que para valores bajos de la misma son rectilíneas y para altos turbulentas, y deduce que hay una velocidad en la que se produce la transición de régimen, que depende de la densidad, la viscosidad y el diámetro del conducto. Ha nacido un nuevo parámetro de semejanza, el número de REYNOLDS, que, para un valor del orden de los dos mil quinientos, separa los flujos laminares de los turbulentos.

JOHN WILLIAM STRUTT, barón de RAYLEIGH (1842-1919), instala en su casa un laboratorio de hidráulica, óptica y electricidad para dedicarse a estudiar la resistencia de los fluidos y las ecuaciones de propagación de las ondas. En 1899 da cuerpo a la teoría del análisis dimensional con la que establece formalmente la modelística reducida, que confirma la existencia y futuro del agua modelada.

Toda una pleyade de estudiosos de lo complejo hecho manejable llena el mundo del líquido elemento. Destaca HUBERT ENGELS (1854-1945), fundador de la hi-

dráulica de los modelos reducidos fluviales. Su vida transcurre creando y desarrollando laboratorios en Alemania, cada vez más nuevos y más grandes. Sigue siempre una sana práctica experimental; prepara cada ensayo de tal manera que pueda variar fácilmente sus parámetros o condiciones de contorno para evaluar la sensibilidad a los mismos; comprueba siempre los resultados y los controla en la estructura real porque sabe que la naturaleza es la única capaz de sancionar la validez de un modelo.

También REHBOCK (1864-1950) es un proyectista de puentes en arco que acaba haciendo modelos hidráulicos. Tiene una oficina de ingeniería en KARLSRUHE y es profesor de estructuras hidráulicas en su universidad. Instala y dirige un laboratorio donde desarrolla la mayor parte de las técnicas usuales aplicables a los ensayos de fondo móvil. Suya es la fórmula de desagüe sobre vertedero.

A lo largo del siglo XX los laboratorios de hidráulica se extienden por todo el mundo civilizado. La técnica de modelos reducidos se convierte en una herramienta indispensable, aunque desgraciadamente limitada. En procesos bidimensionales o tridimensionales la escala transversal obliga a la longitudinal y las dimensiones necesarias para modelar ensayos relacionados con la difusión, materias en suspensión o en disolución, alcanzan magnitudes imposibles de materializar. Un modelo del estuario del Guadalquivir, en el que se pretenda medir la intrusión salina, exige un tamaño del orden de varios cientos de metros de longitud, que lo hace impracticable.

Por eso tiene que producirse el nacimiento de una nueva hidráulica, de un capítulo adicional de ese libro que se está redactando en el cerebro de la humanidad, que permita superar las dificultades del agua formulada y las limitaciones del agua modelada. Sin él no será posible seguir avanzando.

A pesar de eso, la técnica de modelos sigue extendiéndose por todos los países. Cabe citar a FELLENIUS, nacido en 1876 y jubilado en 1941, autor del método sueco de cálculo de estabilidad de taludes, que funda y dirige el laboratorio de hidráulica de la escuela de ingenieros civiles de Estocolmo. Y también a FREEMAN (1855-1932) que consigue, tras larga polémica, que el Congreso de los EEUU autorice en 1930 el laboratorio de hidráulica de Washington. En el siglo XX los poderes públicos ya no son tan sensibles a la ciencia, y resulta heroico para los investigadores tener que convertirse en gestores para convencer a los dirigentes políticos de la enorme importancia que tiene para sus países la inversión en investigación. Vuelve a parecer como si la Naturaleza temiese el progreso intelectual del cerebro humano y obstaculiza, cuando no condena, la ayuda al conocimiento de la verdad.

Como hemos visto, al final del siglo XIX la hidráulica tiene ya desplegadas todas sus herramientas: las teóricas, con las ecuaciones de NAVIER-STOKES y SAINT VENANT, y las experimentales, con las leyes de semejanza y la existencia de manómetros, tubos de Pitot y toda la gama de aparatos de medida para abordar el estudio de los modelos. A los hombres del XX les queda la tarea de integrar las ecuaciones y de resolver la enorme casuística que el rico mundo del agua ofrece ante sus ojos.

Un nombre destaca con luz propia: PRANDTL (1875-1953) que aporta el concepto de capa límite. Sabe que los resultados de la teoría de los fluidos perfectos no resuelven el comportamiento de los reales en la vecindad de una pared, porque allí la viscosidad interviene de forma especialmente notable. Por eso desarrolla unas ecuaciones en derivadas parciales, que relacionan la velocidad en la capa límite con la de la trayectoria libre. Estas fórmulas conducen al conocimiento de múltiples aspectos del flujo alrededor de los sólidos.

Su discípulo KARMAN, que huye a los Estados Unidos del holocausto nazi, resuelve el problema de los remolinos en las estelas tras un obstáculo. Encuentra su velocidad, la misma para todos, que sólo depende de la separación transversal y de la distancia longitudinal que mantienen entre ellos, idéntica para toda la serie, monótona como si se tratase de soldados en un desfile.

A partir de 1950 se disparan los estudios sobre el régimen de los vórtices, de los cuales, hoy en día, todavía no existe una teoría general. Los nombres de BIESEL, SIBULKIN, BINNIE, etc. están ligados a las experiencias particulares del fenómeno.

En el progreso del conocimiento de la fricción se hacen muy populares en el mundo de la técnica dos nombres: NIKURADSE (1932) y COLEBROOK (1939); establecen la fórmula definitiva de pérdida de cargas en tubos en función del número de REYNOLDS y, a través del ábaco de MOODY, proporcionan el arma más precisa para evaluar el impacto del rozamiento en las conducciones.

Una vez explicada matemáticamente la hidráulica, la ciencia se vuelve hacia el aspecto menos comprendido de la misma: la turbulencia. Ligada a la inestabilidad y al caos, consume muchas horas de estudio y gran cantidad de disquisiciones y ensayos. LANDAU (1940) RUELLE Y TAKENS (1971) la analizan como un fenómeno caótico, aspecto sobre el que será preciso volver dentro de unas páginas.

Agotadas las formulaciones clásicas, los científicos actuales dirigen su mirada hacia rincones de la hidráulica que ya poco tienen que ver con nuestra protagonista: dinámica de superfluidos, hidrodinámica relativista, mecánica de cristales líquidos, etc. El conocimiento del agua ha tocado techo. Y sin embargo ese saber es poco útil: en la mayor parte de los casos la formulación es inintegrable y los modelos reducidos inabordables.

El ingeniero sigue proyectando sus obras casi con la misma filosofía de la época en que el agua era mitológica; con un oficio transmitido artesanalmente, mejores materiales, métodos constructivos más sofisticados y herramientas de cálculo muy simples que le sirven para andar por casa: la ley de BERNOUILLI; la fórmula de MANNING; el método racional en hidrología; varias simplificaciones groseras de las ecuaciones de SAINT VENANT para el régimen variado y los cálculos gráficos del golpe de ariete.

Cabe pensar que el esfuerzo de la ciencia de los últimos quinientos años no ha servido absolutamente para nada. Y, como contrapartida, la humanidad se aboca a una situación impredecible pero pavorosa: el consumo de agua está llegando al límite. La demanda del mundo civilizado explota y roza, cuando no supera, la oferta de re-

cursos renovables. Esa situación exige un control del ciclo hidrológico, una planificación, una política de previsiones y un manejo tan cuidadoso del líquido elemento que hace falta, sin duda, la aplicación de todo el bagaje científico.

No se pueden seguir concibiendo las obras de ingeniería igual que dos mil años atrás, porque entonces estaban hechas bajo el prisma de unos recursos abundantes y gratuitos. La nueva situación demanda un control, tan extenso en el espacio y en el tiempo, que exige el empleo de todas las herramientas matemáticas que se han desarrollado para definir el comportamiento del agua. Pero la mente humana se siente incapaz de aprovechar unas bases teóricas que están planteadas de forma imposible de tratar. Y entonces, cuando el hombre es consciente de su impotencia, y no encuentra salida para sus limitaciones, surge milagrosamente el computador. ¿Por azar? ¿O será más bien que el gran cerebro de la humanidad ha llegado al nivel de desarrollo suficiente para que, inconscientemente, se autoproporcione la herramienta necesaria para seguir progresando?

7. EL AGUA SIMULADA

Aunque los primeros computadores son anteriores, no es hasta los sesenta cuando empiezan a ser utilizados con cierta comodidad. Son gigantescos en volumen y en apariencia, frecuentemente averiados y muy lentos, pero se ofrecen como una nueva herramienta que abre puertas que parecían cerradas para la eternidad.

Es en esa década cuando los científicos de todas las áreas se dedican a desarrollar metodologías para que los ordenadores resuelvan los sistemas de ecuaciones diferenciales en los que la naturaleza guarda sus secretos. Son también años en los que se realiza uno de los esfuerzos más estériles de la mente universal de la ciencia: la batalla contra la lentitud y limitaciones de las máquinas.

¡Qué cantidad de horas perdidas, buscando formulaciones más veloces o algoritmos que utilicen la memoria más reducida posible! El avance prodigioso de la tecnología de circuitos vendrá a resolver, en el espacio de veinte años, las angustias del traductor de ecuaciones del hombre a la máquina, porque ésta es infinitamente más potente y rápida; despilfarra en comodidad de manejo los escasos ahorros computacionales que toda una década ha conseguido a duras penas; y hace inútiles los sudores de una extensa generación de modelistas.

Sin embargo, gracias a ellos y a su empeño en aprovechar hasta el último recoveco de una memoria, el ordenador se convierte en la herramienta indispensable de la ciencia y de la técnica. La gran utilidad de los computadores digitales está en su capacidad de obtener resultados cuantitativos de los modelos matemáticos del mundo real. Para ello hay que describirlos en términos de análisis numérico, apoyándose en la nueva matemática del discreto, lo que conlleva a utilizar una imagen conceptual diferente de la realidad física: la modelización numérica.

Más que una traducción de los procesos matemáticos del continuo al lenguaje del discreto, constituye una reformulación del problema real, con la filosofía y las posi-

bilidades del mundo discontinuo. Y también con sus riesgos. Los modelos numéricos actúan describiendo el sistema físico con un conjunto de números, y sustituyen las leyes de comportamiento por una serie de operaciones con esas cifras. En el caso del agua, operan con valores discretos y puntuales de calados, cotas de superficie, velocidades, caudales, pendientes, geometría de los cauces e intercambio de masas en los casos de contaminantes, salinidades, temperaturas, etc. También manejan dígitos que representan el tiempo. De esa manera, pretenden estudiar la evolución de los procesos y, conceptualmente, predecir sus alcances, es decir: adivinar el futuro.

Al hecho de reproducir con números lo que ocurre en la realidad física, se le conoce como: «simulación numérica». Esa terminología lleva implícita una humildad que nunca se debe olvidar: la simulación tiene más de imitación que de reproducción, con todas las limitaciones que posee una réplica del original que puede correr el riesgo de ser una caricatura en lugar de un vivo retrato.

Dos espacios conceptuales se abren a la hora de aplicar esta nueva metodología: el que afecta al comportamiento del agua manejada por el hombre, y el que tiene que ver con la génesis meteorológica de las precipitaciones y el desarrollo del ciclo hidrológico. Para ambos es preciso reformular las ecuaciones de comportamiento para adaptarlas a las posibilidades y requerimientos del discreto. No existe una nítida frontera entre ellos, porque ambos se interrelacionan y se utilizan simultáneamente, pero conceptualmente sí que cabe distinguir uno del otro.

Surgen así dos nuevas ramas de la ciencia: la HIDRÁULICA COMPUTACIONAL, que pretende dar respuesta al primero de los mundos planteados y la HIDROLOGÍA NUMÉRICA que corresponde al segundo. Son dos especialidades diferentes, con distintos nombres propios y diversa problemática y ambas se encuentran hoy en día en plena efervescencia.

El gran cerebro del tejido de la humanidad, que se desarrolla sobre el planeta, se acaba de autotrasplantar un pedúnculo inanimado que es también capaz de almacenar conocimientos y de ayudar al desarrollo de una parte importante del saber. No tiene una naturaleza orgánica pero actúa como si la poseyera. Está formado por los ordenadores, que constituyen sólo una herramienta; pero ¿no lo son también los sentidos, incluso nuestras neuronas? Gracias a ellos, el hombre va a archivar, conservar y transmitir el conocimiento; además le van a permitir introducirse en un mundo nuevo en el que, a partir de entes abstractos, se encuentra con una vida tan real como la propia existencia física: la simulación.

Con ella el hombre representará, como si de una obra de teatro se tratase, el comportamiento de la naturaleza en un computador. Y desde la tranquilidad y frialdad de un despacho deducirá la evolución previsible de los fenómenos físicos y tomará decisiones.

7.1. La hidráulica simulada

La hidráulica computacional aparece reconocida como tal en 1969, en el Congreso de la IAHR de Kyoto, y se sustenta en gran parte en los trabajos de los centros de cálculo de las oficinas consultoras de ingeniería de SOGREAH en Grenoble, DELFT en Amsterdam, DANISH INSTITUTE en Copenhague y HR en Wallingford.

Su objetivo es muy simple: resolver con la ayuda de un ordenador las ecuaciones diferenciales que rigen el mundo de la hidráulica: las de continuidad, las de conservación de energía y cantidad de movimiento y las de difusión, tanto a nivel del continuo diferencial (NAVIER STOKES), como al de sección completa (SAINT VENANT).

Las del primer nivel, imprescindibles para el modelado de la turbulencia, se encuentran aún en fase incipiente porque la información necesaria es tan gigantesca que desborda con mucho la capacidad y potencia de las máquinas. No sólo de las actuales sino también de las que se prevén para la próxima década. Abriendo un camino a la esperanza, ya existen los suficientes desarrollos para garantizar que los modelos turbulentos sólo serán una herramienta cotidiana dentro de treinta años.

La hidráulica computacional macroscópica, de sección completa, se ha dividido en diferentes ramas porque su ámbito es tan extenso que es imposible controlar todas sus aplicaciones bajo una perspectiva común. Las más importantes son las dedicadas a:

- *Flujo en lámina libre*, que se ocupa del comportamiento de canales, ríos, lagos, estuarios y costas, y que puede ser complementada con los modelos que simulan la erosión y sedimentación de cauces.
- *Conducciones cerradas*, cuya formulación se deriva de la anterior, pero presenta una problemática particular.
- *Aguas subterráneas*, con un desarrollo que engloba todo el tratamiento de acuíferos.
- *Modelos de calidad* que, apoyados en algunas de las otras tres ramas, pretenden reproducir la evolución de contaminantes, salinidad, oxígeno disuelto, etc.

Para abordar estos problemas, los artificios numéricos ofrecen tres herramientas básicas: las diferencias finitas, los elementos finitos y los de contorno. BREBBIA (1978) analiza estos distintos métodos para convertir al discreto las ecuaciones de NAVIER-STOKES linealizadas; usando la formulación débil de los residuos ponderados pone de manifiesto que se diferencian tan sólo en las funciones de ponderación empleadas. Sin embargo, y al contrario que en otras ramas de la física, el mundo del agua utiliza muy poco los elementos finitos y los de contorno. Aunque no existe ninguna razón conceptual que lo justifique, casi todos los modelos al uso se decantan por las diferencias finitas, quizás condicionados por la importancia que tiene la variable tiempo en el proceso hidráulico.

La sustitución del continuo por diferentes conjuntos discretos (existen muchas formulaciones en diferencias finitas) produce una pérdida de información y por ende un aumento de entropía. Este hecho, que viene a poner un punto de atención sobre la validez de los resultados de la simulación, tiene como contrapartida la circunstancia de que los esquemas discretos son la mejor herramienta para representar los procesos discontinuos de la realidad, que son irreversibles porque disipan energía. Fenómenos como el resalto hidráulico o la turbulencia no pueden ser abordados sólo por una ecuación diferencial y encuentran en el mundo de lo discreto su natural representación.

EULER plantea las ecuaciones de la hidrodinámica dentro del dominio del continuo. Hoy las discontinuidades son tratadas matemáticamente con la teoría de las distribuciones (SOBOLEV, SCHWARTZ y MIKUSINSKY) mientras que la física de la discontinuidad es abordada por medio de la termodinámica irreversible (GROOT Y PRIGOGINE). Es LAX (1954) el que reúne estas dos grandes tendencias científicas y demuestra su unidad en el análisis numérico, a través de las formulaciones débiles de los sistemas de leyes de conservación.

ABBOTT (1979), uno de los padres de la hidráulica computacional, demuestra que la ley de conservación de la masa y la formulación de EULER para la segunda ley del movimiento no son suficientes para definir la solución del flujo discontinuo. Hay que añadir además otro principio, la segunda ley de la termodinámica, que conduce a elegir la conservación del momento cinético en lugar de la conservación de la energía.

Pero el hecho de que la formulación discreta se apunte el tanto de ser más adecuada que la continua para representar los fenómenos discontinuos, no significa que no presente suficientes inconvenientes como para que deba ser sometida a un profundo análisis. Básicamente hay que considerar sus tres eventuales limitaciones: la reducción de la información, que es infinita a lo largo del continuo, a sólo unos pocos puntos discretos; la simplificación numérica de las ecuaciones diferenciales; y los riesgos de inestabilidad.

El agua necesita ser modelada en el espacio y en el tiempo. Su tratamiento discreto lleva aparejado conocer sus variables solamente en unos puntos concretos que quedan definidos por una cuadrícula espacio temporal. Toda la formulación que proporciona los valores nodales de esa red, se realiza mediante una interpolación entre los mismos. El criterio interpolador adoptado está relacionado muy estrechamente con lo tupido de la malla y el método usado para describir las leyes que determinan el comportamiento hidráulico. El proceso numérico, y con él el resultado final, viene condicionado en gran medida por el establecimiento de esa retícula de cálculo. Se trata, en fin de cuentas, de diferentes aproximaciones, cuya precisión depende de la densidad de puntos, y que deben ser sometidas a un análisis serio de validez.

Muchas son las formulaciones posibles en diferencias que buscan una mayor simplicidad de cálculo, un tiempo de proceso más corto y un menor aumento de entropía. Unas son explícitas, en las que las variables en un instante dado dependen directamente de las del instante anterior, mientras que otras, implícitas, se relacionan

imbricadamente dentro de las ecuaciones. Unas linealizan las expresiones, simplifican el problema y desprecian términos que pueden ser poco trascendentes en determinados casos particulares. Otras abordan el planteamiento no lineal con técnicas especialmente desarrolladas para este tipo de integraciones. Todas, en fin de cuentas, renuncian a una parte, más o menos importante, de la información contenida en la formulación continua.

Por otra parte, no puede hablarse de simulación numérica sin referirse a la estabilidad. Es bien conocido que un proceso es estable en la naturaleza cuando las pequeñas perturbaciones son rápidamente amortiguadas y no influyen en el desarrollo final del mismo. Por el contrario, la inestabilidad lleva aparejada una solución definitivamente distinta por la influencia de una interferencia que parece nimia inicialmente.

Paradójicamente la formulación discreta puede ser causa de una fuente de inestabilidades, exclusivamente numéricas, en fenómenos que físicamente son estables. Cualquier incidente computacional como el de truncar una cifra decimal, obviamente despreciable, puede degenerar el proceso de cálculo y proporcionar una solución falsa que no tiene nada que ver con la realidad.

Hay que distinguir por tanto entre esquemas de cálculo inestables y estables. A veces los primeros aparecen sólo para determinados tamaños de los intervalos de la malla espacio-temporal y puede hablarse de formulaciones condicionalmente estables. Otras, la estabilidad de la solución está garantizada siempre y nos referimos a ellas como desarrollos incondicionalmente estables.

La estabilidad lleva también aparejada la noción de convergencia. Una formulación es consistente si, al tupir la retícula indefinidamente, la diferencia entre las aproximaciones discreta y continua tiende a cero. Pero ese proceso puede ser convergente, es decir para mallas más refinadas se está más cerca del final, o por el contrario generar una aproximación oscilante y desordenada, lo que supone una dificultad importante para determinar la solución en sucesivos cálculos iterativos.

El teorema de LAX (1954) estipula que «la estabilidad es condición necesaria y suficiente para que exista convergencia en una aproximación de diferencias finitas que satisfaga la condición de consistencia». Sin embargo, paradójicamente, cuando se reproducen situaciones discontinuas en el mundo real, en las que la inestabilidad física se presenta en el proceso, como es el caso de la turbulencia, las aproximaciones numéricas estables pueden converger hacia soluciones falsas.

Una de las más conocidas condiciones de estabilidad condicionales es la llamada de COURANT-FRIEDRICHS-LEWY (1928), aplicada básicamente a los explícitos.

El análisis de FOURIER de la solución proporciona una herramienta para analizar la estabilidad de los diferentes modelos. Dibujando los factores de amplificación de los distintos términos de frecuencia y los desfases en la celeridad de las ondas, pueden deducirse condiciones de estabilidad, en lo que respecta a densidad de la malla de cálculo, que amortigüen y supriman las ondas parásitas que generan la inestabilidad. Estos esquemas denominados disipativos pueden ser muy útiles a veces aunque en otros casos lleguen a ser irreales.

Muchos nombres están ligados a la formulación de soluciones en diferencias finitas que dan lugar a distintos tipos de modelos: ABBOTT, CUNGE, IONESCU, Mc. CORMACK, PREISSMANN, SWEBY y VASILIEV para los de régimen libre; ABBOT, ANDERSON, FATTAHI, MOLENKAMP y VIUM para la solución numérica de los problemas de transporte y difusión.

A la hora de especificar las condiciones de contorno del problema matemático, aparece un nuevo aspecto de la hidráulica computacional: el que trata de los reguladores. Uno de los retos más importantes en las redes de distribución es el de adecuar la oferta a la demanda sin pérdida de agua y en las mejores condiciones energéticas.

Para ello ha habido que desarrollar toda una gama de artificios inteligentes que, de forma automática, ejerzan la tarea de regular el régimen hidráulico a pesar de las incidencias incontroladas que provocan los usuarios. Válvulas y compuertas autónomas, variadores de velocidad de bombas, autómatas electrónicos, depósitos y calderines se han convertido en elementos imprescindibles en los últimos diseños de las instalaciones para el manejo del agua.

Su tratamiento ha obligado a conectar la moderna teoría de control con la hidráulica y a utilizar la simulación como herramienta insustituible para predecir su comportamiento, evaluar los parámetros que los gobiernan y ajustarlos para optimizar su función.

Es probablemente en la automatización de canales donde la problemática acentúa su dificultad por tratarse de un régimen libre, de escaso resguardo, con una velocidad de reacción lentísima y grandes tiempos para conseguir una respuesta. Su tecnología ha sido desarrollada a partir de los años 60 y soportada en su mayor parte por dos instituciones: SOGREAH en Grenoble y el U.S. Bureau of Reclamations en Denver, Phoenix y Sacramento. En nuestro país, el equipo que tengo el honor de dirigir ha sido el pionero, motor e innovador de esta tecnología.

GOLZE (1967), CLARK y WOOD (1972), BUYALSKI y FULVEY (1977, 1979) y BECKER (1982) son los nombres claves ligados al establecimiento de las bases teóricas de la regulación automática de canales, y a ellos se deben los diferentes algoritmos de control que dan respuesta al amplio abanico de problemas que se plantean en la vida real.

Un modelo matemático de simulación del comportamiento de este tipo de estructuras debe añadir a las ecuaciones discretas de St. Venant, la formulación en diferencias finitas de las condiciones impuestas por los mecanismos de control así como la conexión de las variables hidráulicas con la toma automática de decisiones.

Los programas europeos de *conducciones abiertas* más utilizados, y que se encuentran en la actualidad en el mercado, aplicables al tratamiento de canales inteligentes son: SIVA (Danish Hydraulic Institute), IMPLIC (Rijkswaterstaat), NETFLOW (Delft Hydraulics Laboratory), CARIMA (Sogreah) y CANAL (Ayesa).

Los modelos de régimen libre aplicados a ríos, estuarios, lagos y costas pueden estar desarrollados con una, dos o poseer las tres dimensiones. Suelen incluir, además de la simulación hidráulica, módulos de sedimentación, intrusión salina y con-

taminación. Los más conocidos son: MIKE-11 y 21 (Danish Institute), TIDEFLOW (HR, Wallingford), CASCADE (Laboratoire d'Hydraulique de France) TELEMAC-2D (EDF) y TRISULA (Delft).

Por lo que respecta a la simulación del comportamiento de *conductos cerrados* cabe distinguir el de las conducciones a presión en régimen estacionario, donde las ecuaciones no lineales de pérdida de carga se resuelven por aplicación del método de NEWTON-RAPHSON; el de los fenómenos transitorios, donde es el método de las características el universalmente adoptado para integrar las ecuaciones hiperbólicas de St. Venant; y por último el caso de las redes de alcantarillado y drenaje que se analizan con las mismas ecuaciones de los canales en régimen variado pero que han de incluir la génesis de caudales a partir de la lluvia, muy ligada al proceso hidrológico que será comentado más adelante.

Estos modelos centran su dificultad en la reproducción exacta de las características físicas y topológicas de las complejas redes reales y del comportamiento de la gran masa de usuarios. El arma matemática es precisa, pero la representación numérica del mundo físico exige un esfuerzo enorme de toma de datos y ajuste del que depende básicamente el éxito del proceso simulador. Casi lo de menos, en un modelo matemático que pretende simular una red, es el programa de cálculo hidráulico: lo verdaderamente importante es la evaluación de los parámetros que definen la realidad.

A mediados de los años sesenta se inician serios estudios para el empleo de modelos numéricos en el análisis del comportamiento del *agua subterránea*. Se usan técnicas analógicas y digitales y se desarrollan métodos tanto para el tratamiento de acuíferos regionales, extendidos sobre una gran superficie, como para pequeñas subcuencas.

La mayor dificultad que presenta la simulación del agua subálvea es que se trata de un problema tridimensional, variable en el tiempo, en un medio heterogéneo de propiedades y condiciones de contorno muy difíciles de evaluar. Las ecuaciones que rigen el proceso son las de continuidad y conductividad, en las que se supone que el caudal es linealmente variable con la pérdida de carga. El coeficiente de proporcionalidad, variando con la dirección, porosidad y fisuración; y el de almacenamiento, función de los huecos existentes en el suelo, son los parámetros que caracterizan cada caso. Cuando estos coeficientes dependen de la profundidad de saturación, o bien se producen discontinuidades por la relaciones del acuífero con reservas locales o con ríos vecinos, el problema se convierte en no lineal.

Las dificultades inherentes al cálculo así planteado han obligado al desarrollo de modelos parciales, bidimensionales, que desprecian la componente vertical del flujo, que sólo tienen componente radial o que introducen otras simplificaciones. Hay que tener exquisito cuidado a la hora de elegirlos para no aplicar herramientas inadecuadas a los casos reales.

Los modelos más conocidos del mercado han sido desarrollados por los mismos organismos y oficinas que han programado los de régimen libre. Pueden citarse: MODFLOW (USGS), MIKE-SHE (Danish Institute) y AQUIFEM (MIT).

El cuarto grupo de modelos se refiere a los que pretenden simular la evolución de la *calidad de las aguas*, y están destinados a controlar el estado de los ríos y el impacto de los vertidos contaminantes en los mismos.

La ecuación diferencial que gobierna el proceso, por el cual la concentración de una determinada sustancia varía a lo largo de un curso de agua, es la de continuidad de masas. La variación en el tiempo de la materia contenida en un elemento se produce por cuatro factores: advección (transporte), dispersión, dilución e incorporación. El primero de ellos está provocado por la circulación hidráulica, y depende del caudal; el segundo por la diferencia de concentración entre un punto y sus vecinos y es proporcional a su gradiente; el tercero por la variación en el tiempo de la concentración en cada punto a causa de reacciones químicas o biológicas y el último por la aportación o detracción puntual de materia en un vertido o sumidero.

Las variables a considerar son variopintas e incluyen las sales, el oxígeno disuelto, la DBO, el nitrógeno en sus múltiples facetas, el fósforo, las bacterias, las algas y hasta la temperatura. Gracias a la investigación soportada por organismos como la Environmental Protection Agency en USA, o los laboratorios de DELFT en Holanda, se han puesto a punto formulaciones que evalúan la génesis de los distintos componentes y sus reflejos matemáticos de dispersión y dilución.

Para dar una idea de la complejidad planteada y del tipo de desarrollos que se han abordado, cabe citar el tratamiento analítico de la concentración de oxígeno disuelto que está controlada, entre otros factores, por la reaeración atmosférica, la fotosíntesis, la respiración de animales y plantas, la demanda béntica, la demanda bioquímica de oxígeno, la nitrificación, la salinidad y la temperatura.

Estas formulaciones son necesariamente simplificadoras y exigen un notable esfuerzo de parametrización, calibrado y ajuste. Hablando estrictamente de modelos que estudien la evolución de la calidad de las aguas y los agentes contaminantes, existe toda una pleyade que inunda la literatura técnica. Destacan los de calidad de ríos: QUALII (EPA), RIVER (Hydroscience), WQRRS (Berkeley); los de estuario: HARO 3 (EPA), JMSRIV (VIMS), GENES (Hydroscience); los urbanos: DR3M-QUAL (USGS), SWMM (EPA), STORM (USCOE-HEC); los de calidad en embalses: MIT (MIT) y los subálveos STYXZ (Delft).

Los modelos numéricos de todos los grupos anteriores tienen una fuerte componente económica. Son costosos de implementar porque su desarrollo es complejo, consume tiempo y se ve superado por la vertiginosa evolución de los ordenadores. Su concepción lleva aparejada la tensión entre la utilización de mallas muy abiertas, para la economía de uso y comprobación, y la estabilidad y consistencia de la solución. La existencia de tanta formulación, y la amplitud de la tipología de problemas viene a poner de manifiesto la dificultad de encontrar un planteamiento en diferencias que refleje inequívocamente la realidad en sus múltiples facetas y variables.

La IAHR ha publicado catálogos de programas de ordenador de aplicación en la ingeniería hidráulica, «Information Exchange on Computer Program», y ha discutido en sus congresos toda la problemática de los diferentes modelos matemáticos. En sus conclusiones pone de manifiesto lo siguiente: la simulación numérica de los pro-

cesos hidráulicos ofrece la ventaja de poder reproducir cualquier escenario, por complejo y enorme que sea, y con cualquier condición de contorno, lo que supera las limitaciones de los modelos reducidos y las dificultades matemáticas de la formulación continua, pero tiene el inconveniente de que sus resultados pueden ser sospechosos de poca fiabilidad y necesitan ser verificados.

Esto implica la necesaria instrumentación física de la realidad y la aparición de una nueva actividad social: la medida y el control de la naturaleza. Una consecuencia adicional es la revitalización del agua modelada físicamente en prototipos a escala. Muchas veces será más cómoda la realización y verificación del modelo numérico con el de laboratorio, que recurrir a la escala natural. En cualquier caso, los modelos tienen que subordinarse siempre a la sanción obligada que proporciona el ajuste con la realidad.

Como contrapartida, la grandiosidad de la presentación de los resultados por los ordenadores actuales; la magia de ver una representación nítida de la naturaleza de forma gráfica, a través de unos algoritmos numéricos; y la tensión, introducida artificialmente por los gobiernos en el mundo científico, de producir investigación masiva para poder subsistir, generan un factor distorsionante en la hidráulica computacional: se ve inundada, al igual que el resto de las ramas de la ingeniería, por una pleyade de modelos, producidos la mayor parte de las veces con dudoso rigor, que se amparan solamente en la espectacularidad y «realismo» de las imágenes que producen.

La dificultad que conlleva la estimación correcta de los parámetros que caracterizan los procesos y el establecimiento de unas condiciones iniciales que contengan la historia; así como el costo del calibrado y de la posterior verificación de los resultados, provocan que la mayor parte de los modelos que se desarrollan carezcan del ajuste necesario para que pasen de ser simples entelequias numéricas a auténticos simuladores de la realidad.

La hidráulica computacional, soporte de lo que hemos venido en llamar hidráulica simulada, se encuentra madura conceptualmente, a pesar de su juventud, pero incipiente por lo que respecta a la potencia y facilidad de empleo de los futuros computadores. El mayor esfuerzo que queda por realizar es el de garantizar la fiabilidad de las simulaciones tanto por un análisis riguroso de las formulaciones discretas y sus consecuencias, como por el ajuste y comprobación física en laboratorio y en el campo del comportamiento de los modelos.

7.2. La hidrología simulada

La hidrología pretende dar solución al desarrollo completo del ciclo del agua en sus fases de precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y circulación por cauces y valles. Sobre todo, tiene la responsabilidad de responder a las cuestiones de cuánta agua se dispone para el futuro, cómo se deben operar los sistemas de explotación, qué riesgos y consecuencias tienen las inundaciones y cómo deben funcionar los sistemas de defensa y drenaje.

Aunque el desarrollo conceptual de la misma se ha producido en la primera mitad del siglo XX, tras las aportaciones irlandesas del XIX, la hidrología no ha tomado cuerpo consistente hasta la aparición del ordenador. La gran dimensión espacio temporal en la que se desenvuelve, la cantidad de datos que hay que procesar y la complejidad de los sistemas de explotación hidráulicos exigen una potencia de cálculo que sólo el empleo del computador permite. El único hecho singular, fuera del mundo computacional, que cabe destacar es la concepción del método del hidrograma unitario desarrollado por SHERMAN en 1932.

Por eso, se puede incluir íntegramente dentro del capítulo del agua simulada. Las inquietudes por las bases teóricas de la misma pueden satisfacerse con la lectura del «Linear Theory of Hydrologic Systems» de DOOGE, publicado en 1973 por el Department of Agriculture de los Estados Unidos.

Si la hidráulica computacional es una rama de la modelística en gran parte europea, no cabe duda de que la hidrología de los modelos es básicamente norteamericana y se ha desarrollado gracias a sus agencias oficiales: Corps of Engineers of US Army; Bureau of Reclamation; Environmental Protection Agency; Soil Conservation Service; Department of Agriculture, etc. así como por la importante aportación efectuada por sus Universidades.

La hidrología es una ciencia que se enfrenta con uno de los retos ancestrales del hombre: la predicción. La adivinación del futuro, materia esotérica por excelencia, es abordada matemáticamente para responder a una serie de necesidades del ser humano. La prognosis se tiene que realizar en dos planos diferentes: uno de ellos, bautizado como «previsión», tiene como objeto el dimensionamiento de obras hidráulicas, en el que el técnico se plantea qué tamaño tiene que darle a un embalse para que pueda aprovechar una lluvia que está por venir y que ofrece la incertidumbre del volumen que aportará; el otro plano, que se conoce como «pronóstico», está relacionado con el trabajo en tiempo real. La pregunta es, en este caso, qué caudal va a llevar un cauce dentro de dos horas: ¿será capaz de inundar una ciudad? ¿cómo responderá esa riada a una serie de maniobras de los elementos de control de que dispone el sistema hidráulico?

Esa predeterminación del porvenir debe servir para una toma de decisiones de las que dependen, dramáticamente, la economía y la vida de la población, lo que introduce un aspecto de optimización de los resultados en el que las restricciones de la función objetivo tienen carácter no sólo hidráulico o económico sino también social.

La primera dificultad con la que se encuentra el científico es la naturaleza inestable de la meteorología. Es preferible utilizar este concepto de falta de estabilidad, en lugar del más a uso de caótico. Pues bien, la indeterminación del comportamiento climático a partir de un plazo, necesariamente breve, y por hoy muy difícil de superar, convierte a la hidrología en una ciencia de procesos estocásticos.

En la situación actual del saber humano no hay otro camino que usar el conocimiento de la historia pasada, de los sucesos ya producidos, para, extrapolando, inferir a partir de ellos el mañana. En el tratamiento de los problemas hidrológicos los datos de entrada al sistema pueden ser: exactamente los históricos, intentando compro-

bar cómo hubieran funcionado nuestras obras y cuáles hubiesen sido las decisiones correctas si se hubiera repetido esa historia; o bien los obtenidos a partir de un futuro inventado que guarde una serie de relaciones de tipo estadístico con el pasado.

A veces el problema pierde su carácter aleatorio y pasa a estar determinado: el agua precipitada puede en algunos casos ser conocida. La lluvia de hace unas horas provocará un caudal, dentro de otras pocas, a cierta distancia. En esa situación el problema ya no es estocástico sino determinista. Por eso se puede afirmar que la mayor parte de los problemas hidrológicos son no lineales, con componentes deterministas y aleatorios, distribuidos, dependientes del tiempo y dinámicos.

La hidrología plantea al científico varios frentes de batalla que podrían resumirse en tres grandes grupos: el conocimiento de los datos de entrada al sistema que se pretende analizar (lluvia y caudales de ríos); la determinación del proceso que sufre esa entrada dentro del sistema, hasta concluir en un caudal efluente y unos volúmenes almacenados; y, por último, la toma de decisiones ingenieriles para operar con las variables de salida.

7.2.1. La previsión simulada

El primero de los grupos anteriores, el conocimiento de los datos de entrada al sistema, genera a su vez dos líneas de trabajo: el establecimiento de una red de medida, adecuadamente instrumentada, que pueda proporcionar datos para un trabajo en tiempo real de tipo determinista, o para ajustar los modelos; y la determinación de series sintéticas de entrada que intenten predecir el futuro, que se introduce de lleno en el terreno estocástico. Ambas requieren técnicas de optimización estadística y no tienen otro tratamiento que el de las funciones aleatorias.

La primera de ellas reviste una gran importancia porque la instrumentación de una cuenca es muy costosa y, simultáneamente, es una labor poco intuitiva. La distribución de estaciones de medida a lo largo de una gran superficie, realizada exclusivamente bajo el criterio del buen ojo hidrológico, implica un riesgo elevado de no acertar y haber despilfarrado recursos cuantiosos. El camino lógico para llevar a cabo esta operación comienza por modelar adecuadamente la cuenca y realizar una selección y análisis de los parámetros a instrumentar en función de su sensibilidad.

EAGLESON (1967) aborda el problema de determinar la densidad óptima de estaciones de medida, con el objetivo de realizar pronósticos exactos de caudales, usando la teoría de sistemas lineales deterministas en el dominio de la frecuencia.

En 1974 RODRIGUEZ-ITURBE y MEJIA, formulan un método para el diseño de redes de pluviómetros que incorpora una estructura de correlación multidimensional del proceso de lluvia. Desarrollan un marco general para estimar la varianza de la precipitación a largo plazo, una subárea concreta y la lluvia del área media de una tormenta. La varianza es expresada como una función de la correlación en el tiempo y en el espacio, la duración de la operación de la red y la geometría de la cuenca.

El uso posterior en el diseño de redes de instrumentación del filtro de KALMAN, al que volveremos después, será definitivo en comparación con las técnicas anteriores. El método considera el error de las medidas y la ubicación particular de las observaciones en forma sistemática, no aleatoria. Con él, se puede estudiar cualquier configuración de red a base de medir la variación espacial del error.

En la otra línea de actuación, el grueso del trabajo de los hombres de lo estocástico es el de la obtención de series sintéticas de datos que, de alguna manera, representen el futuro manteniendo las características observadas en el pasado. El objetivo de la simulación de la hidrología sintética es producir un conjunto de series de precipitaciones o aportaciones, tan largas como sea necesario, indistinguibles desde el punto de vista estadístico de las históricas y que exhiban muchas características hidrológicas que no aparecen explícitamente en los registros reales. La generación sintética de series hidrológicas (simulación de Monte Carlo) es popularizada al principio de los 60 por el trabajo del Harvard Water Program (MAASS et al 1962).

A partir de entonces se produce una explosión de métodos y técnicas que son recogidos en gran parte en el trabajo presentado al Workshop on Recent Developments in Real Time Forecasting. (WOOD 1980). El primer intento de controlar un sistema de embalses, usando modelos estocásticos para pronosticar eventos hidrológicos, es realizado por JAMIESON et al. (1972). A partir de ahí, la obtención de series sintéticas para obtener los datos de entrada de un sistema hidrológico se convierte en una técnica cotidiana.

Los esfuerzos realizados van en dos líneas diferentes: la elaboración de series en el tiempo y el análisis en el dominio de la frecuencia. Las series temporales se generan con diversas técnicas estadísticas en función de que los datos históricos tengan carácter estacionario (Modelos ARMA) o no, como es el caso de la influencia estacional, (Modelos ARIMA).

Los estudios hidrológicos tienen normalmente una naturaleza multivariada. La planificación de una cuenca incluye múltiples embalses, con flujos relacionados entre sí, y los datos de lluvia proceden de diferentes estaciones pluviométricas que se ven interrelacionadas por la distribución espacial de las tormentas. Es obligado recurrir al análisis multivariado, pero presenta grandes dificultades teóricas y computacionales por la falta de una teoría unificada para representar conjuntamente cada uno de los procesos aleatorios que intervienen en el modelo, y por la ardua tarea de estimar los parámetros, que puede exigir un volumen de datos inmanejable.

Han sido puestas a punto diferentes versiones de modelos ARMA, estacionarios o estacionales, así como el llamado Modelo de Desagregación, siguiendo la filosofía de ajustar los momentos de las series históricas. Destacan los trabajos de MATALAS (1967), CLARKE (1973), SALAS (1977), PUENTE (1978) y CURRY Y BRAS (1980).

La generación de series sintéticas que abarquen un gran número de años plantea el problema de las influencias del largo plazo. MANDELBROT y WALLIS (1968) denominan el «efecto de Noah y José» al hecho de que la duración de una sequía, o una época de abundancia, pueda ser más larga que lo que se deduce de la observa-

ción de la serie histórica. Y esa circunstancia no es recogida por los modelos ARIMA porque los procesos Markovianos fallan al reproducir los valores extremos.

Otra, puesta de manifiesto por HURST (1951) al estudiar la capacidad necesaria de un embalse para que aproveche íntegramente los recursos de una cuenca, es que el valor del volumen preciso crece exponencialmente con la longitud de la serie sintética más deprisa que lo que corresponde a una serie independiente normal.

MANDELBROT (1965) y VANNESS (1968) proponen modelos para considerar el efecto HURST (modelos de ruido Gaussiano fraccional) y que los embalses no queden infradimensionados. Una extensa discusión sobre este tema es abordada por LETTENMAIER Y BURGESS (1977) y KLEMES et al (1981).

Resulta paradójico observar el apasionamiento que puede generar una densa formulación matemática que cierra los ojos ante la triste realidad del punto de partida:

- Ninguna serie sintética es más cierta que la observada históricamente.
- Las extrapolaciones a un gran número de años (mil o más) sitúan siempre a los embalses de un lado pesimista por la propia disimetría del fenómeno, que tiene en cuenta las largas sequías, penalizando el comportamiento simulado, y no aprovecha, por falta de capacidad, las series largas de abundancia. Es decir, a medida que simulan períodos de tiempo mayores el embalse necesario precisa más volumen.
- La simulación con series sintéticas no ofrece más que un carácter cualitativo del devenir, porque la inestabilidad meteorológica puede introducir cambios en los estimadores estadísticos en períodos de tiempo importantes.
- Únicamente son herramientas insustituibles a la hora de completar datos parciales de una subcuenca, y al relleno de lagunas, pero conceptualmente no tienen por qué aportar más fiabilidad que la simulación realizada a partir de las experiencias históricas.

Por lo que respecta al análisis en el dominio de la frecuencia, son muchos los partidarios de utilizarlo en lugar de las series de tiempo. LAURENSEN y O'DONNELL (1969) ponen de manifiesto que la solución del problema de precipitación esorrentía es muy sensible a los errores de los datos, y que, sin embargo, el análisis armónico trabaja muy bien incluso con la presencia de series contaminadas, por su inherente mecanismo de filtrado.

Debo confesar el profundo escepticismo que me producen todas estas técnicas de pronóstico estadístico, que extraen pretenciosas conclusiones de poblaciones de datos obligadamente reducidas. Sólo el ego matemático, que se siente satisfecho cuando resuelve planteamientos difíciles, sean reales o del tipo charada, justifica a mi modesto parecer tanto esfuerzo. Como, además, es imposible saber a posteriori si se ha acertado o no, porque los resultados caen después en el indeterminado reino de las probabilidades, la discusión sobre su validez es estéril. Como contrapartida hay que admitir que son el único camino para intuir las leyes que gobiernan a las superestructuras que ordenan el mundo inestable de la meteorología. No cabe duda de que

cuando se disponga de series históricas mucho más largas, conducirán, de una forma o de otra, a la verdad.

7.2.2. El proceso simulado

El objetivo del proceso hidrológico es convertir los datos, de precipitación y de aportación a la entrada de una serie de cuencas, en el caudal de salida y en los volúmenes almacenados en la misma. Toda la mecánica de infiltración, escurrimiento, evaporación, propagación y almacenamiento pretende ser simulada para predecir el impacto del agua en las vidas y economías de los hombres.

AMOROCHO Y HART (1964) señalan las dos líneas de trabajo en que, a grandes rasgos, se dividen los especialistas en la materia: las que se pueden denominar teoría física y teoría de sistemas.

En la primera se profundiza en comprender y formular cada uno de los componentes del ciclo hidrológico en orden a definir sus mecanismos e interacciones. Los esquemas numéricos y modelos matemáticos de este primer grupo intentan reproducir fielmente las ecuaciones físicas que rigen los fenómenos.

En la teoría de sistemas se admite que la complejidad de los procesos es tal, y su conocimiento tan inadecuado, que el esfuerzo por reproducirlos a nivel computacional sólo sirve para la autosatisfacción del que se siente intérprete de la naturaleza. Bajo esta premisa, la forma más lógica de actuar consiste en medir las variables observadas e intentar establecer sencillas relaciones algebraicas entre ellas, con la esperanza de que sean ciertas dentro del rango de condiciones normalmente encontradas en la práctica.

Las teorías basadas en el comportamiento físico exigen el conocimiento detallado de las variables de entrada, la estructura física de la cuenca, siempre compleja, y las leyes matemáticas que gobiernan los procesos. En cambio los expertos en teoría de sistemas, eluden la modelización de la hidráulica y se basan en el concepto de caja negra que enlaza las variables de entrada con las de salida; los parámetros que gobiernan estos enlaces no tienen sentido físico y están obtenidos a partir de experiencias previas.

La diferencia entre ambos métodos es más aparente que real. Todo problema hidrológico puede reducirse a una gran caja negra, llena de otras más pequeñas. En la aproximación física se logra abrir algunas de ellas y conocer lo que hay en su interior. Pero el resto continúa tan cerrado como en la teoría de sistemas. El progreso científico traerá sin duda en el futuro la apertura de sucesivas cajas. Pero cabe preguntarse si llegará el día en que estén todas abiertas.

Para poner a punto modelos que resuelvan el problema directo, es decir obtener un hidrograma efluente a partir de pluviogramas, es preciso resolver el problema indirecto: determinar la función de transferencia, cuando se conocen las variables de entrada y salida en cuencas instrumentadas, en un proceso de calibrado y ajuste.

Una vez resuelto el problema inverso se dispone de una herramienta capaz de simular la realidad. Pero en ninguna otra especialidad como en la hidrología ha de hacer la física un mayor esfuerzo de síntesis. La complejidad de la naturaleza, la enorme dimensión del dominio y la aleatoriedad de las variables de entrada exigen una simplificación de gran envergadura para hacerla asequible a un modelo numérico. De ahí la dificultad de elaborar una simulación que sea verosímil y que maneje el menor número de parámetros e indeterminaciones posibles.

Hay muchos modelos de simulación hidrológica, lo que implica que están cuajados de limitaciones porque, en caso contrario, bastaría con uno. Los pioneros fueron: el STANFORD WATERSHED MODEL (CRAWFORD y LINSLEY 1962); el USGS FLOOD HYDROGRAPH MODEL (DAWDY, LITCHY y BERGMANN, 1970); el USDA WATERSHEED HYDROLOGY MODEL (HOLTAN y LOPEZ) 1973 y el NATIONAL WEATHER SERVICE MODEL (CURTIS y SMITH 1976).

Dado que el principal problema que plantea el agua hidrológica simulada es la complejidad del fenómeno representado, que exige evaluar un gran número de variables para definir el proceso de simulación, el único camino razonable para asegurar la fiabilidad de los resultados estriba en la comprobación real de las imágenes proporcionadas por el modelo, así como el ajuste previo de los parámetros que gobiernan el sistema con mediciones en cuencas bien instrumentadas.

A la hora de seleccionar cuáles son las variables que interesa ajustar es preciso realizar un análisis de sensibilidad que ponga de manifiesto cuáles son aquellas por las que el fenómeno está más influenciado. La optimización del número de parámetros ajustables puede realizarse por diferentes métodos, de los cuales los más clásicos son los elaborados por CAUCHY (1847), GREEN (1970), DECOURSEY y SNYDER (1969) y ROSENBROCK (1960).

Una vez seleccionados aquellos que inducen una mayor sensibilidad, el modelo debe ser calibrado. Esta operación consiste en dar unos valores a esos parámetros que minimicen los errores que aparecen a la hora de simular el comportamiento de una cuenca instrumentada ante diversos eventos de ajuste. No se puede hablar de que se dispone de un modelo de simulación si se trata simplemente de una herramienta numérica que no está adecuadamente ajustada; circunstancia que, desgraciadamente, se produce con una frecuencia e irresponsabilidad alarmantes.

Existen varios métodos para calibrar esos parámetros. Destacan las aportaciones de NASH 1959; DOOGE 1973; HARLEY 1967; O'MEARA 1968 VANDE NES 1971; YEVEVICH 1972; CLARKE, etc. VIJAY P. SINGH (1988) recoge el estado del arte de este aspecto fundamental de los modelos numéricos hidrológicos.

Los sistemas expertos, que se han aplicado normalmente al manejo de abastecimiento de aguas, explotación de sequías, operación de embalses, plantas depuradoras, etc., también se han utilizado para calibrar estos modelos. Así, para hacerlo con el HSPF (EPA) se ha desarrollado el HYDRO; y para el modelo de escorrentía de nieve SRM (MARTINEC 1975) se ha utilizado el EXRM. También existe un sistema experto que aconseja la adopción de determinados parámetros para manejar el QUAL2; y de esa misma manera se utiliza el ESCALOS para calibrar el SWMM.

Los sistemas expertos pueden constituir una buena herramienta para hacer las tres funciones básicas que exigen los parámetros de una cuenca: estimar su valor inicial; realizar un diagnóstico de su calibración y ajustar los valores más adecuados.

Los modelos de simulación se presentan al usuario como paquetes informáticos elaborados por equipos hidrológicos de oficinas de ingeniería, agencias gubernamentales y Universidades, y se basan en los trabajos científicos de una pleyade de hidrólogos y matemáticos que llenan las últimas tres décadas de desarrollos parciales de la modelística numérica.

En una apretada síntesis pueden citarse los prototipos pioneros desde un punto de vista operativo: los modelos lineales de caja negra, para intervalos discretos de tiempo, COLLINS (1939), NEWTON (1967), DELAINE (1970), LEVI y VALDES (1964), SNYDER (1961); modelos conceptuales para sistemas continuos en el tiempo, CHOW (1964), CHAUDHRY (1976), SINGH y McCANN (1979), TE Y KAY (1983); modelos lineales conceptuales para intervalos discretos en el tiempo, O'CONNOR (1982); modelos lineales variables con el tiempo, O'DONNELL (1966), MANDEVILLE (1973), WHITEHEAD (1979); modelos conceptuales no lineales, ROGERS (1980), KULAN DAISWAMY (1979), DING (1974), CHEN y SINGH (1976); y cajas negras no lineales, basadas en las series integrales de VOLTERRA, PPAZAFIRIOU (1978), KUCHMENT y BURSH CHEUSKY (1971), DISKIN-BONEH (1972).

La relación de paquetes de modelos de simulación es tan extensa que sería imposible relacionarla aquí en la necesaria brevedad del ámbito de este documento. Cabe decir que no hay departamento universitario, empresa consultora o centro de investigación que no haya desarrollado alguno.

En el ámbito puramente hidrológico el mayor esfuerzo ha sido realizado en el campo de la simulación del fenómeno precipitación-escorrentía. Los modelos más populares son conceptuales y se dividen en: los que representan el flujo continuo, HSP (Hydrocomp 1975), HSPF (EPA 1980, 1984), SACRAMENTO (Burnash, Department of Water Resources of State of California 1985), SIMULATION URBAN RUNOFF PROCESS (Australia WRC 1977); y los que se refieren a un hecho aislado (single-event), HEC-1 (US Army 1981), TR55 (Soil Conservation Service, 1975), SEDIMOT II (Universidad de Kentucky 1985), HYDROGRAPH-2 (Oklahoma T.P. 1985), etc.

Varios de ellos son aplicables a la hidrología urbana. Los problemas de evacuación del caudal de tormentas tienen una alta prioridad en muchas localidades. Sin embargo el interés en la calidad de los efluentes urbanos, como consecuencia de la lluvia, no se pone de manifiesto hasta el Acta de Calidad del Agua de 1987, la última de una serie de legislaciones estadounidenses que comienza en 1972 con el Acta del Agua Limpia. La Environmental Protection Agency publica un reglamento en Noviembre de 1990 de manera que, a partir de ahí, una gran parte de los caudales de tormenta han de manejarse como puntos fuertes de contaminación. Concretamente en lo que refiere a sedimentos: (arena, limo y arcillas en suspensión coloidal); nutrientes (fósforos y nitrógeno); materia orgánica; sustancias tóxicas (metales pesados, pesticidas, aceites y productos petrolíferos); y agentes patógenos (virus y bacterias).

En el campo del pronóstico en tiempo real se ha desarrollado una nueva generación de modelos de simulación, son los adaptativos, que utilizan los valores medidos en la salida del sistema para reajustar sobre la marcha el proceso y obtener las salidas pronosticadas. Esto implica una estructura del modelo con realimentación en la que el error entre los pronósticos anteriores y las medidas efectuadas lo adaptan para las nuevas previsiones.

La teoría de sistemas proporciona una estructura matemática a este planteamiento: el sistema discreto en el tiempo de GAUSS-MARKOV. El algoritmo del filtro de KALMAN (1960) sirve para minimizar la varianza del error de los pronósticos realizados y se ha convertido en la herramienta por excelencia en las previsiones en tiempo real.

Como cierre de este apartado cabe decir que FREEZE (1978) define las limitaciones de los modelos hidrológicos agrupándolas en cinco categorías: dificultad para simular el comportamiento mal conocido de las variables hidrológicas; escasez de datos de campo para la calibración y operación; tamaño de los computadores; procedimientos de calibración y la escasa incorporación que tienen en los modelos al uso las operaciones de explotación de los sistemas hidráulicos.

7.2.3. La decisión simulada

El tercer plano sobre el que se ha enfocado la mirada científica es el de la toma de decisiones. De nada sirve la Hidrología si no permite decidir al ingeniero cuál debe ser el volumen del embalse a proyectar; qué desembalses debe realizar; de qué presas hay que hacerlo; cuál es el momento adecuado; qué trasvases; qué recargas de acuíferos; cuándo hay que evacuar a una población, etc. etc. Esta obvia necesidad conduce a un tercer paquete de modelos: los simuladores de la explotación. La herramienta para la toma de decisiones vuelve a ser también simulada.

Esta tarea es compleja y nunca inmediata: las aportaciones futuras son desconocidas; los sistemas a explotar se extienden a lo largo de un enorme territorio y tienen numerosos puntos de control sobre los que es posible actuar: presas, canales, estaciones de bombeo, etc. Los usos son variopintos, dispersos por la geografía y la mayor parte de las veces contradictorios: la demanda eléctrica puede no coincidir en el tiempo con la de regadíos; la seguridad frente a riadas exige tener los embalses lo más vacíos posible; en cambio la garantía de suministro futuro demanda el mantenerlos lo más llenos que se pueda; el medio ambiente condiciona a conservar los cauces con caudal permanente, y el uso recreativo de los pantanos prefiere una lámina que oscile muy poco.

Existen muchas alternativas que respondan más o menos satisfactoriamente a este planteamiento, por eso la toma de decisiones obliga a definir una función objetivo que pueda ser optimizada bajo algún punto de vista y que proporcione las instrucciones para manejar los elementos de control de la mejor manera posible. LOUCKS (1976) define el criterio ideal como una función que relaciona las variables de deci-

sión con el bienestar social de la sociedad. Pero el principal problema es que este concepto incluye parámetros difícilmente evaluables: el impacto ambiental, el papel social del regadío en poblaciones que no tienen otro medio de subsistencia, etc.

COHON y MARKS (1975) hacen una revisión completa de las técnicas de programación multiobjetivo que se usan en este terreno de los recursos hidráulicos. Y llegan a plantear ecuaciones en las que se ponderan los objetivos de eficiencia económica, con una serie de restricciones, para simular las funciones de bienestar social.

Se podría desarrollar toda una teoría económica con la pleyade de trabajos que abordan el tema y que incluyen los beneficios, las pérdidas y los costos, tanto a corto como a largo plazo. Obviamente el problema queda planteado dentro del marco de la programación y el ingeniero debe centrarse en la búsqueda de una solución óptima con restricciones. Las dificultades inherentes al problema son de dos tipos: que éste incluye funciones no lineales (la generación hidroeléctrica y la evaporación, p.e.) y que los datos de entrada son desconocidos, porque afectan al futuro.

Dos grandes grupos de modelos de simulación de la explotación se desarrollan a partir de la última dificultad: los deterministas, que suponen conocida la serie de futuras aportaciones al sistema, y los estocásticos que admiten una función probabilística tanto para la alimentación del modelo como para los resultados del mismo. En cuanto a las técnicas de resolución, la más utilizada es la programación lineal, linealizando obviamente las ecuaciones, aunque en las décadas de los 60 y los 70 se emplea con frecuencia la programación dinámica.

Las dificultades del problema generan multitud de modelos productos de tesis doctorales, trabajos universitarios, de consultores y de agencias oficiales. El primero, cronológicamente, es desarrollado por THOMAS y WATERMEYER (1962) basándose en la teoría de colas. Más tarde DIETRICH y LOUCKS (1967) le incorporan el efecto de las correlaciones de los flujos. BURAS (1963) usa un algoritmo estocástico con programación dinámica para la operación conjunta de un embalse y un acuífero.

HALL y ROEFS (1966) aplican la programación dinámica a embalses hidroeléctricos con datos deterministas. HARBOE et al (1970) usan una programación dinámica modificada para determinar operaciones óptimas a largo plazo para un embalse multipropósito. En 1979 CROLEY publica un estado del arte del desarrollo de la modelística de la decisión en la operación de embalses, que es ampliado en los conceptos de programación matemática por SIMONOVIC y MARIÑO (Berkeley 1981).

También estos últimos ponen a punto un modelo lineal, estocástico para un gran sistema de embalses, en los que la garantía pasa a ser una variable del problema. Para ello, desarrollan la técnica de «programación de la fiabilidad» en la que se maximiza una función objetivo denominada «función de utilidad» que relaciona los beneficios con la garantía. Parece lógico maximizar simultáneamente el resultado económico de una decisión con la probabilidad de que se obtenga esa rentabilidad.

En cualquier caso, el esfuerzo computacional de estos modelos es tan elevado que, hoy en día, las grandes opciones ingenieriles se deciden casi siempre apoyadas en

modelos deterministas que simulan conceptualmente las operaciones: SIM V y ALV (Texas Water Development Board), HEC 5 (US Army Corps of Engineers), HYDROCOMP (Glasgow), HYDRA (Ayesa), etc.

En ellos la toma de decisiones obedece a criterios de programación lineal; la entrada de datos puede ser histórica, en tiempo real, o generada sintéticamente; y la salida es no sólo la política de explotación a corto y a largo plazo sino también la garantía con que se cuenta, computada a partir de los fracasos obtenidos en la simulación.

7.3. Los riesgos de la simulación

El agua simulada es, por tanto, el quinto capítulo de ese libro del saber que venimos comentando. Y sus páginas aún están redactándose.

Al finalizar cada uno de los capítulos anteriores, el hombre ha tenido que cerrar todo un proceso, poniendo en cuestión las páginas escritas previamente, y abrir otro nuevo. Conviene, por tanto, reflexionar sobre el que estamos escribiendo en el presente para conocer si ya hemos acertado con el camino correcto o, por el contrario, nos encontramos en una etapa más que pronto será clausurada y sustituida por otra.

El agua es un bien escaso, un recurso aleatorio utilizado en un gran espacio por un número elevado de usuarios dispersos que inciden en su disponibilidad porque consumen, regulan, trasvasan y contaminan. El hecho de que la demanda alcance, e incluso supere, a la oferta en muchas regiones y países exige la elaboración de estrategias minuciosas que permitan un uso racional y una optimización del recurso.

Sólo al conocer y evaluar la génesis hidrometeorológica del agua, el papel regulador de los embalses y sus criterios de dimensionado, las condiciones de los cauces fluviales como medio de transporte, la evolución en el espacio y en el tiempo de sus características químicas y orgánicas, las redes de distribución inteligentes y el comportamiento de los consumidores, se está en disposición de emprender una explotación correcta del sistema.

Para todo ello existe un sustrato científico potente que ha ido sedimentándose con el paso de la historia y que nos da herramientas básicas para abordar el problema. Todas las páginas previas han venido a describir el grado de conocimiento al que ha llegado la humanidad. Sin embargo, la complejidad que origina la gran dimensión espacio-temporal del dominio, la aleatoriedad de la génesis del proceso, y la incidencia de la actuación humana y sus instrumentos de regulación, dejan al ingeniero inerme de herramientas matemáticas de planteamiento y resolución clásicas. Sólo la posibilidad del empleo de los modelos matemáticos, y su aplicación en potentes computadores, abre hoy la puerta al conocimiento, predicción y toma de decisiones en las políticas de explotación de los sistemas hidráulicos.

Con ellos, se intenta simular, en el pequeño espacio de una memoria RAM, todo el inmenso mundo del agua, de manera que, casi milagrosamente, veamos en la pantalla de nuestro ordenador cómo llueve, cómo escurre, cómo se evapora o cómo in-

filtra; contemplemos el flujo hidráulico por los torrentes y vaguadas hasta la paz serena de un embalse; recibamos criterios de cómo manipular sus compuertas, y volvamos a ver las aguas discurrir por los cauces ordinarios, inundar los de avenidas y ser derivadas por los canales de transporte; aprendamos cómo se mueven solas las compuertas inteligentes para retener hasta la última gota no empleada, ahorrar energía y garantizar que todos van a disponer del líquido elemento; visualicemos el reparto de caudales y presiones en una compleja red urbana de tuberías, percibiendo hasta los fenómenos transitorios y su incidencia en toda la parafernalia de estaciones de bombeo, calderines antiarriete, válvulas de regulación y otros artefactos del sistema; controlemos los focos de contaminación, las redes de evacuación de aguas residuales; y veamos circular la polución química y orgánica, cómo se autodepura o cómo aparece la eutrofización, cómo y cuánto se sedimenta o cuál es la evolución de la intrusión salina en un estuario.

Este es el mundo del agua simulada. Casi un universo de herramientas de modelado que permite reproducir analítica y visualmente la compleja realidad de la naturaleza; que nos ayuda a predecir el futuro inmediato para poder evacuar a una población con tiempo; que nos dicta las políticas de explotación a medio plazo y que nos describe el mañana con sus incertidumbres de nuevas sequías o con la necesidad de planificar las nuevas obras y la remodelación de las viejas.

No cabe duda de que es un mundo cautivador. La emoción que siente el técnico ante la representación gráfica, cada día que pasa más vivida y más real, del inmenso fenómeno natural produce la mayor de las satisfacciones. Nunca olvidaré el día en que vi un resalto hidráulico propagándose lentamente sobre la superficie de un canal modelado en mi pantalla, y cómo volvía después de chocar contra un imaginario muro frontal. Un desarrollo matemático, una hábil programación y aquel conjunto de cerros y unos, producía una película tan nítida y tan fiel como si se hubiera fotografiado en la realidad.

El agua simulada, al igual que otros tratamientos similares del campo de la física, de la biología o de la sociedad, nos transporta de lleno a la realidad virtual del científico. La sociedad actual crea para el placer imágenes virtuales de la existencia, que cada día son más perfectas y que permiten «vivir» en la soledad de una segura habitación las más arriesgadas e insólitas aventuras, en las que incluso podemos participar interactivamente. Esa misma sociedad también proporciona al hombre de ciencia un mundo virtual en el que puede recrear, reproducir y modificar a voluntad los más complejos fenómenos físicos.

Y es aquí donde aparece la gran pregunta: si la realidad virtual nos lleva por mundos aparentemente reales, pero que son falsos, ¿no puede ocurrir lo mismo con la realidad virtual de la simulación científica? ¿No corremos el riesgo de dejarnos convencer por la aparente verosimilitud de lo que simulamos, pero que no responde al comportamiento cierto del fenómeno? ¿No existe la posibilidad de que las herramientas de modelado sean simplemente generadores de futuribles, absolutamente lógicos y posibles, pero que están muy lejos de lo que va a ocurrir en la Naturaleza?

Hoy en día, vivimos desbordados por los modelos matemáticos. En la literatura científica, técnica e incluso comercial aparecen cotidianamente nuevas herramientas de simulación. Puede hablarse sin exagerar de una explosión de prototipos y es raro el investigador novel, el departamento universitario o el centro de cálculo, que no trabaja en la creación del programa de turno.

Sin embargo, es raro encontrar una discusión seria y rigurosa de su validez. Los conceptos de unicidad de la solución, estabilidad, convergencia y otros similares brillan por su ausencia. Sistemáticamente se limitan a aplicar el modelo recién elaborado a uno o dos ejemplos conocidos y frecuentes en la literatura técnica, ajustarlo a los mismos para que el resultado sea llamativamente coincidente y, sin detenerse a pensar, comenzar a crear otro nuevo con más variables, más potente y, a la vez, con mayor grado de indeterminación.

Actualmente corremos el riesgo de la frivolidad técnica. Al ingeniero usuario de los modelos le faltan preparación científica y tiempo para juzgar críticamente las herramientas que le suministran. Las casas comercializadoras de software buscan eficacia aparente, espectacularidad de resultados y comodidad de manejo. Es al mundo universitario y científico al que corresponde poner orden en el mundo caótico, en el doble sentido, de la concepción de los modelos de simulación. A reflexionar sobre este problema y a contribuir a poner un acento de alarma sobre el agua simulada va encaminado este discurso.

8. EPÍLOGO: UN MUNDO SIMULADO

Confieso que, hace unos años, la lectura de LEIBNITZ me producía perplejidad. No podía entender cómo el padre de la matemática moderna, pionero del cálculo diferencial y poseedor de una de las mentes más lógicas de la Historia, era capaz de afirmar con rotundidad la existencia de las mónadas.

Para el insigne alemán nuestra alma reside en un minúsculo ente, una mónada, que vive encerrada en sí misma, sin posible percepción ni comunicación con las demás. Y para explicar lo que entendemos por la realidad que nos rodea, y en la que nos desenvolvemos, sostiene que cada mónada vive un mundo particular, una especie de película, desconectada del exterior, que constituye nuestra impresión de la vida.

Afirma LEIBNITZ que las imágenes de todas las mónadas están sincronizadas, de manera que cuando una mónada imagina, y cree al unísono, que ve a otra, la mónada contraria está a su vez viviendo en su interior la escena de que es vista por la primera. *«No es que mi mónada pensante perciba a tu mónada material, sino que en el desarrollo potencial de mi mónada pensante aparece tu mónada material cuando en su desarrollo potencial pasa por delante de mí, mal llamado, campo visual»*. Y para explicar esa asombrosa coincidencia pone el ejemplo de dos relojes que no se ven pero que marcan idéntica hora al mismo tiempo. Dios sería así una especie de gran relojero encargado de sincronizar nuestras vidas aisladas y aparentemente, sólo aparentemente, compartidas.

Ciertamente nunca llegué a entender cómo alguien podía plantear semejante teoría, porque, si fuera realmente así, qué más daba que las visiones de las diferentes mónadas fueran simultáneas o no. Sin embargo, un día sentí un escalofrío recordando esta particular visión de la existencia. Fue cuando conocí la realidad virtual. La técnica nos ofrece, a través de los computadores, la posibilidad de vivir mundos hipotéticos, cada vez con mayor realismo y verosimilitud. La ciencia ficción nos ha abierto la posibilidad, cada día más próxima, de percibir y disfrutar un universo fantástico, inexistente, permaneciendo aislados de una realidad difícil, y por la que puede llegar a perderse el interés, a cambio de esa otra vida falsa que corre el riesgo de convertirse en la única y disparatada existencia.

LEIBNITZ apareció ante mis ojos como el precursor de la realidad virtual, y su enunciado, que la técnica hace cada día más posible, había perdido el carácter de absurdo. Otra de sus frases comenzó también a parecerme con sentido: «*el mundo en que vivimos es el mejor de todos los posibles*», a pesar de que fuera ácida y divertidamente contestada por BRADLEY al añadirle: «*y todo en él es un mal necesario*». ¿Cuáles son todos los mundos posibles? ¿Por qué el mundo real tiene el carácter de óptimo?

CANTOR (1873), famoso matemático ruso, señala ya la diferencia entre el conjunto de todos los números reales que forman el continuo y las infinitas series de conjuntos que se forman con las series discretas en él contenidas: no son equivalentes. El mundo se puede describir mediante una formulación del continuo y mediante infinitas formulaciones discontinuas que, siendo consistentes con la primera, se diferencian en el tamaño de malla espacio-tiempo y en los criterios de interpolación.

Muchos de esos desarrollos discretos dan soluciones inestables y, por tanto, muy lejos de la realidad física que pretenden representar; otros dan soluciones aproximadas y degradadas de la formulación continua porque tienen pérdida de información y provocan un aumento de entropía, cosa que no ocurre con las ecuaciones diferenciales continuas. Paradójicamente, como expone ABBOTT (1979), algunas soluciones discretas están más cerca del mundo real observado que las continuas, lo que ocurre en flujos que provocan turbulencias o paso de régimen lento a rápido generando discontinuidades y unas pérdidas bruscas de energía que la formulación continua no es capaz de detectar.

No se puede decir que el mundo sea esencialmente discontinuo o continuo. El mundo físico es completamente indiferente a nuestras descripciones, que son entes de razón que ayudan a la mente humana a percibirlo a través de una inteligencia artificial. Pero, precisamente por eso, las infinitas formulaciones posibles, todas ellas consistentes, pueden describir otros tantos mundos artificiales, aparentemente reales, de los cuales sólo uno es el físico. Cabría decir así, extrapolando a LEIBNITZ, que enfrentados a un computador que simula el proceso del agua, asumimos el papel de mónada aislada que vive una realidad virtual con infinitos escenarios eventuales: sólo uno de ellos, el mejor posible, es el mundo real.

Todo científico que se precie debe ser consciente del riesgo que corre al desarrollar modelos de simulación sin abordar un análisis serio de los conceptos de que

garantizan la verosimilitud de la solución. Siempre que se simulan fenómenos dinámicos y se discreta la variable tiempo se corre el riesgo de pronosticar un futuro que diverge sustancialmente del porvenir real.

De igual manera, no basta con tener una formulación correcta estable y convergente. La síntesis de la compleja realidad, enorme síntesis, que se introduce para hacer manejable la simulación, exige una evaluación correcta de los parámetros del modelo porque es muy fácil llegar a formular exactamente otro mundo irreal: el que tiene las características físicas supuestas, que no coinciden con las que existen realmente.

ABBOTT (1982) dice elegantemente que *«el matemático transforma el mundo material de su existencia en un pensamiento, mientras que el ingeniero transforma un pensamiento en el mundo material de su existencia»*. Bajo esa perspectiva el matemático debe ser el modelador de la naturaleza y a él compete la tarea de garantizar la adecuación de la solución discreta a la física; el ingeniero debe usar el modelo para controlar y regular la naturaleza y está obligado a ser él quien calibre la herramienta de simulación para que simule la realidad física del problema que lo ocupa.

La falsa simulación corre el riesgo de producirse con más frecuencia de la deseada. Las Universidades fomentan la investigación a ultranza, lo que mantiene a gran parte de su personal dedicado a producir urgente y con frecuencia nuevos desarrollos de algo que, sarcásticamente, podría denominarse seudoinvestigación. La facilidad de uso de los computadores actuales, y el infinito campo de las formulaciones discretas, permiten la proliferación desmesurada de modelos que carecen de los planteamientos rigurosos que hemos señalado.

Y esa producción incontrolada no es privativa del agua; en esta Ilustre Academia el profesor MARGALEF (1987) ya decía que *«la mayoría de los modelos matemáticos de ecosistemas consideran el sistema gobernado por parámetros sencillos aceptando una reversibilidad total. Pero la irreversibilidad es la esencia de la autoorganización. En biología es obvio que áreas de poca energía pueden generar importantes novedades evolutivas»*. Lo que equivale a decir que una naturaleza inestable no puede ser simulada por un modelo estable.

Esta reflexión del profesor MARGALEF nos puede inducir a una pregunta: ¿vale la pena hacer un esfuerzo computacional de formulación rigurosa, y otro costosísimo de calibrado, si la predicción hidrológica está condenada al fracaso por el carácter inestable de la meteorología, que es la generadora del ciclo hidrológico? ¿Es posible simular algo que depende del caos y el desorden? Esas cuestiones merecen una respuesta, aunque sea bajo la óptica de una humilde visión personal.

8.1. La simulación del caos

La primera cuestión que hay que plantearse es si existe el caos y, si es afirmativa la respuesta, cuál es su naturaleza. Puede resultar pretencioso abordar aquí una materia que enfoca tanta atención, que genera tanta controversia y que se ha conver-

tido en uno de los tópicos de este siglo. Pero el agua arroja una serie de lecciones al respecto, que sería de una gran pobreza de espíritu no intentar generalizar.

En el MARIA MOLINER se dan dos definiciones para el caos: «*situación en que hay mucho desorden y confusión*» o «*Confusión y desorden que precedió a la ordenación del mundo*». Ambas son contradictorias. Si el acto de la Creación implica una ordenación, todo, a partir de entonces, está ordenado y no es posible que después exista el desorden.

Esta es la tesis de PIERRE SIMON DE LAPLACE (1814) en su «Ensayo filosófico sobre las probabilidades», que apuesta por un absoluto determinismo y considera el estado presente del Universo como el efecto del estado anterior y como causa del que lo seguirá. Esta afirmación, por ahora desautorizada por los mecanocuánticos, pero con la que personalmente comulgo, fue inspirada en el principio de causalidad de LEIBNITZ, otra vez vuelve el genio alemán a aparecer en estas páginas: «*Nada ocurre sin una causa o al menos sin una razón determinante, lo que es decir algo que justifique a priori por qué existiría o no y por qué tendría esta forma y no otra*».

Y, sin embargo, todos somos conscientes de que el desorden está presente en la naturaleza y en nuestro entorno. ¿Cómo puede ser compatible un mundo determinista, que obedece hasta en su última partícula a unas leyes, y sin embargo aparecer desorganizado? LALANDE (1983) define el orden como «*una expresión de determinaciones temporales, espaciales y numéricas que incluye series, correspondencias, leyes, causas, objetivos y normas estéticas, jurídicas, morales y sociales*».

FAVRE (1988) dice que «*el desorden es un estado de hecho del que no se es capaz de extraer ninguna clase de relación*». En esta definición, que compartimos, el desorden es subjetivo porque lleva implícita la incapacidad del perceptor para extraer la relación que liga los diferentes componentes que aparentan estar desordenados. Es decir, una cosa anárquica no implica más que el hombre no conoce, o no puede conocer, el orden que lleva implícito. Ahí aparece una salida para la contradicción anteriormente planteada: todo el mundo está ordenado pero no somos capaces de percibir las reglas que rigen la mayor parte del mismo.

Obviamente se trata de un problema de escala. Cuando observamos un cuadro impresionista a unos centímetros de distancia sólo podemos contemplar un confuso revoltijo de pinceladas, sin orden ni concierto, que parecen estar distribuidas con carácter aleatorio. Sin embargo, si retrocedemos unos metros la obra aparece brillante, llena de sentido y con un orden y una armonía perfectas.

El mundo del agua es turbulento. La turbulencia es la regla en la mecánica de fluidos y las partículas se mueven alocadamente en innumerables remolinos impredecibles, con distintas direcciones. Y, sin embargo, mirados desde un punto de vista macroscópico esos remolinos ofrecen una estructura ordenada, predecible y mensurable. El resalto hidráulico disipa energía en un movimiento aparentemente caótico, pero que parte de un calado conocido, acaba en otro absolutamente determinado, su longitud se puede precisar y el balance de masa, momento cinético, velocidades y energía responde a unas leyes específicas.

Si fuéramos capaces de medir todas las variables de entrada y de resolver las ecuaciones de NAVIER-STOKES, seríamos capaces de reproducir el aparentemente desordenado mundo de la turbulencia. Sólo es la limitación humana la que impide el conocimiento, y la soberbia del hombre la que lo lleva a negar lo que ignora. Podemos modelar, y con ello predecir, lo sencillo: una recta sólo precisa dos puntos para poder, después, adivinar la posición de cualquier otro; una circunferencia tres; una esfera cuatro; un movimiento turbulento necesita millones de lecturas de las tres componentes de velocidad, presión, temperatura y densidad a lo largo del tiempo en fracciones muy inferiores a la del segundo: imposibles de controlar. Pero eso no significa que no esté determinado.

El caos, como desorden, no existe más que en la mente humana. De hecho, se habla del caos determinista como el desorden aparente cuyos fenómenos complejos y fluctuantes son representables por ecuaciones deterministas. Para evaluar el grado de desorden de un fenómeno caótico, cuya estructura no es percibida a las escalas de observación humana, se utiliza la técnica de medir una serie de variables, realizar un análisis de FOURIER de las mismas y estudiar la correlación temporal de las fluctuaciones de las diversas amplitudes cuando el tiempo tiende a infinito. Si esa correlación existe, se habla de caos determinista. Si tiende a cero se habla de caos desordenado, aunque eso no quiere decir otra cosa que, probablemente, las variables elegidas para el análisis espectral no sean las adecuadas, y que si se hubieran seleccionado las que realmente rigen el proceso aparecería la correlación que nos denuncia el orden oculto a nuestros ojos.

Dentro del estudio del caos se ha desarrollado una matemática llena de travesura con la que, con sencillos algoritmos deterministas iterativos, se generan resultados de aspecto caótico, similares a los de muchos sistemas dinámicos no lineales. (Aplicaciones de POINCARÉ). LIBCHABER determinó experimentalmente la generación de la turbulencia desde el régimen laminar y comprobó que seguía las pautas de las bifurcaciones consecutivas de FEIGENBAUM, que a su vez son analíticamente representables por un simple algoritmo recurrente.

La turbulencia, aparentemente caótica y compleja, no sólo puede ser representada por sencillos procesos deterministas sino que obedece a una homotecia interna, que genera una estructura superior, que se encuentra confirmada por la aplicación de los fractales al caos e incluso por las teorías de LORENZ y su escuela. Y, lo que es más importante, los valores numéricos que caracterizan esta homotecia son idénticos a los de otros procesos que también se creen caóticos de la economía, biología, astronomía, etc.

Partiendo de la base que nos proporciona el mundo del agua de que no existe el desorden sino la impotencia del hombre para desentrañar el orden, la simulación del caos sólo será posible si el cerebro humano llega a conocer la estructura finalista del mismo, es decir si conseguimos coger la perspectiva suficiente para contemplar la estructura ordenada que, sin duda, subyace tras el caos de las subestructuras turbulentas.

El agua pone de manifiesto que es posible modelar analíticamente el comportamiento de diferentes estructuras superpuestas a distintas escalas: las ecuaciones de NAVIER-STOKES simulan el funcionamiento diferencial del continuo, que es una escala superior a la molecular, y las ecuaciones de ST VENANT representan fielmente el papel macroscópico de las estructuras que forma el fluido en canales y tuberías. Con seguridad, los fenómenos que hoy sólo somos capaces de observar a nivel caótico, en tanto en cuanto son desordenados ante la mente humana, mantienen una superestructura que podrá en su día también ser formulada, modelada y simulada.

8.2. *¿Un mundo determinado?*

Al asumir, a pesar de los mecanocuánticos, y con el corazón puesto románticamente junto a EINSTEIN, el principio Laplaciano de que todo obedece a leyes deterministas, surgen a su vez las clásicas y sistemáticas preguntas de si somos libres, si nuestro futuro está escrito y si podremos llegar a simular ese mañana predeterminado.

FAVRE (1988) distingue tres clases de determinismo: el físico-matemático, el experimental no estadístico y el experimental estadístico. Para el primero exige dos condiciones generales: que el sistema físico esté completamente definido y que los cambios y transformaciones que se producen en el mismo estén gobernados por leyes representables por tantas ecuaciones como incógnitas existan. También precisa de tres condiciones especiales: que se conozcan las condiciones de contorno, las fuerzas y eventos que inciden sobre el mismo y las condiciones iniciales, incluida la historia del sistema. Si eso es así, se puede saber con exactitud el futuro para procesos reversibles e irreversibles, y el pasado sólo para los reversibles.

El determinismo experimental se basa en el hecho de que, aunque no se conozcan las condiciones generales, el fenómeno se repite cada vez que se ensaya manteniendo las condiciones iniciales. Por ejemplo, yo sé que sembrando una semilla nace una flor. Soy capaz de predecir el resultado final futuro sin conocer las ecuaciones ni sus variables.

Por último, se dice que el determinismo tiene carácter estadístico si el fenómeno es explicable a nivel de medias de una serie de fenómenos repetidos. Si uno tira mil veces una moneda al aire sabe que obtendrá quinientas caras y quinientas cruces.

Pero todas las definiciones de la determinación son siempre hechas bajo el punto de vista de un determinismo humano. Para nosotros sólo es determinista lo que podemos determinar y aleatorio, desordenado, o caótico lo que escapa a nuestra capacidad de determinación. Vuelve la soberbia del hombre a irrogarse el protagonismo de clasificar la evolución de los procesos.

Sin embargo, en sentido absoluto, cabría hablar de un único determinismo, el físico, que rige todo el comportamiento de la naturaleza, aunque permanezca ignoto para el hombre. Y si no añado el adjetivo matemático es porque no sé responder a la pregunta que me hizo un día el profesor SAMARTIN: ¿Sabe Dios matemáticas? En

otras palabras el comportamiento matemático de la física ¿no es otra cosa que una elucubración intelectual para justificar una serie de fenómenos y leyes que también son reproducidos por sencillos algoritmos de caja negra? La increíble armonía de lo creado, su orden, lleva a indicar que existe también una matemática con mayúsculas que gobierna la Creación. Y sin embargo también escapa, por ahora, al intelecto del hombre que se limita a establecer la formulación de leyes sintéticas de fenómenos complejos.

Volvemos otra vez a la limitación humana. El hombre no conoce, ni puede conocer, los límites espacio temporales del universo ni las condiciones de contorno del macroespacio y el microespacio. No tiene capacidad para concebir el dominio, no goza de una adecuada escala de tiempos, es incapaz de observar sin perturbar y no posee la precisión absoluta: nuestra observación del universo está mal condicionada.

Evidentemente, bajo el prisma del saber humano, el mundo es indeterminado e impredecible. Haría falta conocer con precisión infinita las leyes de la naturaleza y la situación inicial del universo para predecir los pasos siguientes. Pero como se trata de un sistema altamente inestable, los pequeños errores de medida de nuestra propia limitación nos impiden la predicción y los resultados reales son aleatorios para nuestra percepción. Por otro lado, la perturbación en el fenómeno, generada a veces por nuestra propia observación, añade un factor imposible de determinar.

Sin embargo, eso no excluiría que el Universo fuera realmente determinista y que el famoso diablo de Maxwell, capaz de hacer medidas exactas sin alterar el proceso, no fuera capaz de predecir la evolución del mismo. Cabe preguntarse que qué más da: si el hombre está mal condicionado para percibir ese determinismo, para él es como si no lo fuera. Y aquí surge de nuevo el tema de las superestructuras que señalábamos al principio de esta exposición: es imposible predecir el detalle de un fenómeno inestable, pero si el caos aparente dispone de una estructura superior determinista, ésta podría ser percibida a pesar de nuestro pobre condicionamiento. Lo que abre una puerta a la esperanza de alcanzar el conocimiento y la predicción finalista aún contando con nuestras limitaciones.

Por otro lado, se puede afirmar, gracias a la inestabilidad, que el que el mundo sea determinista no implica que no tengamos libertad. En cualquier instante podemos variar las condiciones especiales y el resultado será diferente. ¿Existe libertad para modificar un comportamiento hidrológico? Los principios generales de la hidráulica son la conservación de la materia, energía y cantidad de movimiento así como las leyes que gobiernan el comportamiento de las partículas materiales. Dado que estos principios son variacionales están formulados en términos de ecuaciones en derivadas parciales. Su solución, por medio de integrales, involucran arbitrarias, y por eso contingentes, constantes y funciones que corresponden a las condiciones especiales de un sistema particular. Las condiciones de contorno varían el resultado introduciendo contingencia, y si las muevo yo, porque quiero, introduzco libertad.

¿Está también nuestra decisión controlada por nuestras propias variables de estado? ¿Son nuestros actos el producto de una química determinista? Seguramente sí, pero dado que las ecuaciones que nos rigen son absolutamente inestables y las pe-

queñas perturbaciones provocan cambios de comportamiento desproporcionados, nadie puede predecir cuál será nuestra decisión. Lo que en la práctica equivale a afirmar nuestra libertad.

¿Ni siquiera Dios? Si el universo es un sistema determinista, inestable y de una dimensión espacial y temporal tan desorbitada para el hombre, el Creador tendría que hacer un esfuerzo supremo para, en una escala paralela a la humana, computar cada paso de nuestra vida. Para Él, intemporal, le resultaría más fácil ver el final de la película que ir analizando paso a paso la evolución de los billones de billones de variables que rigen nuestra existencia.

Por eso, si el mundo se repitiera nunca volvería a sucederse tal cual ha sido. Sólo si las infinitas condiciones de contorno iniciales fueran absolutamente idénticas el mundo volvería a ser el que fue. La imposibilidad física de que en un ciclo repetitivo ocurra tal circunstancia, garantiza que, si el Universo volviera a comenzar, la historia sería absolutamente diferente y también de muy difícil, e imposible en la práctica, pronóstico.

Existe un riesgo filosófico al considerar determinista sólo lo que es determinable por el hombre y desordenado lo que así aparece a nuestros ojos. Con esa actitud, negamos la naturaleza de la realidad física, simplemente porque no conocemos sus pautas de comportamiento, y desaparece la tensión, esa maravillosa tensión, por descubrirla e ir escribiendo nuevos capítulos en el gigantesco libro del cerebro de la humanidad.

Es más positivo pensar que todo está ordenado y formulado, que hace falta tan sólo encontrar el punto de vista adecuado para comprender el por qué y el cómo de cada nivel estructural y que la humanidad tiene aún por delante la bella tarea de conocer el orden que impera en el aparente caos que rige el universo y que, estoy convencido, no existe.

También es cierto que las limitaciones espacio temporales y perceptoras del hombre van a impedir el conocimiento total, y quizás nunca podamos simular todo el mañana. Pero sí podremos hacerlo con aspectos parciales del mismo. Para ello, nos tendremos que conformar con encerrarnos en nuestra mónada matemática, acudir a la realidad virtual, adaptarla con honestidad y rigor a lo que va sucediendo a nuestro alrededor e intentar mirar al desorden que nos rodea buscando el maravilloso orden que Dios ha impuesto al bello mundo que nos ha otorgado.

Y no podemos perder la esperanza de que un día se ofrezca ante nuestros ojos la formulación global de una estructura única, macroscópica y microscópica, que nos descubra súbitamente ese Orden que todo lo gobierna y del que nosotros formamos parte.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ABBOTT: «COMPUTATIONAL HYDRAULICS» LONDON. Pitman. 1979.
- ABBOTT, CUNGE: «ENGINEERING APPLICATIONS OF COMPUTATIONAL HYDRAULICS» (Vol. I) BOSTON Pitman. 1982.
- ADAMSON: «BLAISE PASCAL» NEW YORK. St. Martin's Press. 1995.
- ANDERSON & BURT: «HYDROLOGICAL FORECASTING». NEW YORK. John Wiley & Sons. 1985.
- BEN SARI: «GROUND WATER MODELLING AND PRESSURE FLOW». SOUTHAMPTON. Computational Mechanics Publications. 1991.
- BEVEN: «CHANNEL NETWORK HYDROLOGY». NEW YORK. John Wiley & Sons. 1993.
- BIAGIOLI: «GALILEO, COURTIER» CHICAGO. The University of Chicago Press. 1993.
- BLAIN & CABRERA: «COMPUTER TECHNIQUES AND APPLICATIONS» SOUTHAMPTON BOSTON. Computational Mechanics Publications. 1992.
- BLAIN & CABRERA: «FLUID FLOW MODELLING». SOUTHAMPTON-BOSTON. Computational Mechanics Publications. 1992.
- BRAS & RODRIGUEZ-ITURBE: «RANDOM FUNCTIONS AND HYDROLOGY» MASSACHUSETTS. Addison-Wesley. 1985.
- BRAS: «HYDROLOGY» MASSACHUSETTS. Addison-Wesley Publishing. 1990.
- BREBBIA: «COMPUTER AIDED ENGINEERING IN WATER RESOURCES» SOUTHAMPTON. Computational Mechanics Publications. 1991.
- CUNGE et al: «PRACTICAL ASPECTS OF COMPUTATIONAL RIVER HYDRAULICS». BOSTON. Pitman. 1980.
- FAUVEL: «LET NEWTON BE» OXFORD; Oxford University Press. 1988.
- FAVRE et al: «CHAOS AND DETERMINISM» Baltimore & London. The Johns Hopkins University Press. 1995.
- GALLAGHER et al: «FINITE ELEMENTS IN FLUIDS» (4 Vol.) NEW YORK. John Wiley & Sons. 1982.
- GARBRECHT: «HYDRAULICS AND HYDRAULIC RESEARCH. A HISTORICAL REVIEW». ROTTERDAM, A.A. Balkema. 1987.
- GRAY et al: «FINITE ELEMENTS IN WATER RESOURCES». LONDON. Pentech. 1976.
- GUILLEN: «FIVE EQUATIONS THAT CHANGED THE WORLD». LONDON, Little, Brown and Company. 1995.
- HOGGAN: «COMPUTER-ASSISTED FLOODPLAIN HYDROLOGY AND HYDRAULICS». NEW YORK. Mc Graw-Hill. 1989.
- KOBUS: «HYDRAULIC MODELLING». LONDON. Pitman. 1980.
- LEIBNITZ: «TRES TEXTOS METAFISICOS» BARCELONA. Grupo Editorial Norma. 1992.
- LOSADA VILLASANTE: «¿QUE ES LA VIDA?». SEVILLA. Real Academia de Medicina. 1992.
- MAHMOOD, YEVJEVICH: «UNSTEADY FLOW IN OPEN CHANNELS» FORT COLLINS (COLORADO) Water Resources Publications. 1975.
- MANZANO MARTOS: «EL AGUA EN LA ANTIGUEDAD PUNICA Y ROMANA». MADRID. FFCC. 1995.
- MARGENAU: «LA NATURALEZA DE LA REALIDAD FISICA». MADRID. Tecnos. 1950.
- NIX: «URBAN STORMWATER MODELING AND SIMULATION». BOLARATON. Lewis. 1994.
- NORDON: «L'EAU CONQUISE». PARIS. Masson. 1991.
- NORDON: «L'EAU DEMONTREE». PARIS. Masson. 1992.
- NOVAK: «DEVELOPMENTS IN HYDRAULIC ENGINEERING» (4 Vol). LONDON. Applied Science Publishers. 1983.
- ORTH: «MODEL-BASED DESIGN OF WATER DISTRIBUTION AND SEWAGE SYSTEMS». NEW YORK. John Wiley & Sons. 1986.

- QUAZAR et al: «COMPUTATIONAL HYDRAULICS AND HYDROLOGY» SOUTHAMPTON-BOSTON. Computational Mechanics Publications. 1991.
- REY PASTOR: «ELEMENTOS DE ANALISIS ALGEBRAICO». MADRID. Martín. 1956.
- RODI: «TURBULENCE MODELS AND THEIR APPLICATION HYDRAULICS». ROTTERDAM. IAHR. 1979.
- RUSSELL: «HISTORIA DE LA FILOSOFIA». MADRID. Aguilar. 1973.
- SIMONOVIC & MARIÑO: «RESERVOIR SYSTEMS PLANNING AND DESIGN BY RELIABILITY PROGRAMMING». DAVIS Water Science and Engineering Paper 5005. 1981.
- SINGH: «FLOOD HYDROLOGY». DORDRECHT/BOSTON. Reidel. 1987.
- SINGH: «HYDROLOGIC SYSTEMS». NEW JERSEY. Prentice Hall. 1988.
- SMITH: «PERCEPTIONS OF GREAT ENGINEERS». LIVERPOOL. University. 1993.
- TAYLOR et al: «NUMERICAL METHODS IN LAMINAR AND TURBULENT FLOW». LONDON. Pentech-Press. 1978.
- VERA: «CIENTIFICOS GRIEGOS» (2 Vol.) MADRID. Aguilar. 1970.
- WALDROP: «HYDRAULICS AND HYDROLOGY IN THE SMALL COMPUTER AGE» (Vol. 1). NEW YORK. ASCE. 1985.