# OPORTUNIDADES EN LAS CIENCIAS HIDROLOGICAS

**OSCAR J. MESA S.**

Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Medellín

Nota de la dirección. El presente trabajo comenta el libro titulado Oportunidades en las Ciencias Hidrológicas, del Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos, pero transciende la reseña del mismo al ocuparse de la situación en Colombia y mostrar cómo los desafíos que ella enfrenta son superiores a los planteados por el Comité designado por dicho Consejo y cuyo informe dio origen al libro. El autor presenta su propia lista de prioridades en cuanto a desafío científico para Colombia, señala hacia dónde deben orientarse los esfuerzos y concluye con algunos comentarios sobre la educación.

Las ciencias hidrológicas deben transformarse profundamente para asumir los retos creados por la modificación inadvertida que el hombre ha venido ejerciendo sobre el clima, el ambiente y los ecosistemas. Esta es la principal conclusión de dos años de trabajo del Comité nombrado por el Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos para hacer un diagnóstico y analizar las oportunidades en las ciencias hidrológicas. El Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos (National Research Council) es la principal agencia operativa de la Academia Nacional de Ciencias, la Academia Nacional de Ingeniería y del Instituto de Medicina de ese país. Este Comité, presidido por Peter Eagelson de MIT, estuvo formado por 18 investigadores en distintas áreas relacionadas con el agua, cubriendo la meteorología, la química del agua y de la tierra, la oceanografía, la ecología, la geomorfología, las ciencias del suelo, y la hidrología superficial y subterránea. El libro objeto de esta reseña es su informe final[1].

Entre los miembros del Comité conviene mencionar por sus relaciones con Colombia y con el Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Facultad de Minas de Medellín a Ignacio Rodríguez-Iturbe de MIT, antes de la Universidad Simón Bolívar y del Instituto de Altos Estudios de Venezuela, y a Vijay K. Gupta de la Universidad de Colorado en Boulder.

La convocatoria del Comité fue motivada por la emergencia cada vez más clara y apremiante de los problemas globales (de la tierra entera) que obligan a una descripción y comprensión multidisciplinaria de la evolución y la interacción de las distintas componentes de los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la tierra, en los cuales el agua y su circulación global juegan un papel central.

Las ciencias hidrológicas deben acompañar, entender y orientar la capacidad que la humanidad ha adquirido para modificar (de manera no intencionada) el planeta.

Esta preocupación debería ir acompañada de mayor conciencia en Colombia. La presente temporada de sequía (1991-92) con sus tremendas consecuencias económicas, sociales y políticas es una clara campanada de alerta. Tenemos hoy certeza de que nuestro clima está ligado a fenómenos planetarios en el Pacífico, a la llamada Oscilación del Sur y al Fenómeno de El Niño. Adicionalmente es muy pertinente preguntarse por los efectos locales del llamado cambio climático global producido por el constante crecimiento de la concentración de $CO_2$ en la atmósfera resultado de la industrialización. Algunos estudios, por ejemplo hablan de que el efecto invernadero producirá incremento en la frecuencia del fenómeno de El Niño. Para completar, la deforestación de las selvas y bosques tropicales tiene efectos dramáticos no solo en los ecosistemas directamente afectados sino que también modifica regional y globalmente el clima. Estimativos preliminares y probablemente pesimistas indican que la deforestación de la selva Amazónica produciría una reducción de la precipitación media anual para Colombia del orden de 500 mm, lo cual representa para algunas zonas reducciones de más del 40% , y tendría para todo el país repercusiones drásticas en todos los campos.

La anterior reflexión muestra la importancia que el libro objeto de la reseña tiene para Colombia, para sus autoridades políticas y académicas y para todas las instituciones públicas privadas que de una u otra manera tienen que ver con el agua. En particular considero de vital importancia este estudio para orientar la acción de las universidades y centros de investigación.

La principal conclusión del Comité se refiere a la constatación de que no es posible enfrentar los retos que

los problemas globales representan con la estructura actual que ha sido diseñada y desarrollada para satisfacer las necesidades pragmáticas, de corto plazo y de escala local de la comunidad ingenieril. Para enfrentar estos retos es necesario la construcción y desarrollo de una infraestructura científica y educacional en ciencias hidrológicas. Sobre este aspecto se profundizará más adelante.

Las ciencias hidrológicas hacen parte de las geociencias, que incluyen también a las ciencias atmosféricas, oceánicas, glaciológicas y geológicas (o de la tierra sólida). Siguiendo la interpretación de la Fundación Nacional para la Ciencia de los Estados Unidos (National Science Foundation) el término ciencias de la tierra se refiere a las ciencias de la tierra sólida incluyendo la geología, la petrología, la sismología y la vulcanología. El término Ciencias del Sistema de la Tierra incluye además de las geociencias, a las ciencias que estudian la biota y a otras ciencias solares y espaciales que tienen por objeto los efectos extraterrestres sobre el planeta.

El informe reconoce claramente el carácter plural de las ciencias hidrológicas que se nutre de diversas disciplinas como las ciencias atmosféricas y oceánicas, la geoquímica, la geología, la geomorfología, las ciencias del suelo, la fisiología de las plantas, la ecología, etc. El carácter de los problemas planteados no respeta las fronteras tradicionales y organizativas existentes entre las diferentes ciencias. La individualidad y distinción de las ciencias hidrológicas se consolidará a medida de su desarrollo. El Comité delimita dominio de las ciencias hidrológicas de la siguiente manera:

- Procesos del agua a nivel continental: los procesos físicos y químicos que movidos o caracterizados por el ciclo del agua continental tanto en forma sólida, líquida como de vapor, en todas las escalas (desde los procesos microscópicos del agua en los suelos hasta los procesos globales de la hidroclimatología), incluyendo los procesos biológicos que interactúan significativamente con el ciclo hidrológico (la transpiración de las plantas y muchas actividades humanas) pero excluyendo los procesos que meramente responden al agua como por ejemplo el ciclo de vida de los organismos acuáticos.
- Balance global del agua: las características espaciales y temporales del balance del agua en los tres estados y en todos los depósitos principales: atmósfera, océanos y continentes. Esto incluye volúmenes, tiempos de residencia, flujos y caminos entre los depósitos y no incluye los procesos físicos, químicos o biológicos internos a los depósitos atmosféricos y oceánicos.

El Comité reconoce la contribución que el aprovechamiento de los recursos hidráulicos ha hecho al nivel de salubridad pública y seguridad disfrutado por la población urbana del mundo desarrollado. Igualmente resalta la importancia del uso controlado del agua en la agricultura, la hidroenergía y la navegación. Señala igualmente que el avance en el conocimiento sobre el agua a nivel científico y tecnológico ha respondido a esas necesidades limitadas pero que no corresponde a las exigencias de los problemas globales y de escala continental.

En Colombia tenemos un desarrollo desigual y combinado. Mientras se tienen ciudades con adecuados abastecimientos de agua potable todavía hay centros urbanos y un gran número de pequeñas poblaciones y la mayoría de la población rural sin adecuado suministro. El riego está concentrado en zonas de agricultura comercial, mientras grandes extensiones que podrían beneficiarse con riego suplementario en los meses y/o años secos permanecen con agriculturas artesanales o de subsistencia y en gran medida con ganadería extensiva. Las pérdidas económicas y de vidas por inundación en nuestro país son constantes, inmensas, incalculadas y en lo fundamental no hay mayor esfuerzo por prevenirlas o mitigarlas. La navegación fluvial está abandonada, sujeta al deterioro de las cuencas, a la sedimentación de los ríos y a las sequías. El manejo del suelo, el agua y las cuencas es inapropiado a la gran pluviosidad, altas pendientes andinas, temperatura y radiación prevaleciente, lo que produce deterioro acelerado y en algunos casos irreversible.

Las ciudades, las industrias y la minería aluvial continúan deteriorando la calidad del agua de los ríos, ciénagas y lagunas. La deforestación producida por un proceso inapropiado de colonización contribuye significativamente al panorama global de cambio climático. A ello se agrega que la colonización no se constituye en solución económica o social para los colonos que simplemente abren paso a la expansión de los grandes terratenientes reproduciendo los conflictos que la generaron.

El panorama colombiano es pues mucho más desafiante que el planteado por el Comité pues incluye simultáneamente los asuntos de escala global y de carácter multidisciplinario con los problemas locales no resueltos aún, algunos agravándose progresivamente. Incluso algunos de ellos no son tradicionales, ni pueden solucionarse con la simple aplicación de los métodos y las tecnologías desarrolladas en los países del primer mundo.

El libro incluye dos hermosos capítulos sobre el agua y la vida, el ciclo hidrológico y el desarrollo histórico de las

ciencias hidrológicas. Esto sirve de motivación y de argumentación a favor de la propuesta sobre las ciencias hidrológicas. Por ejemplo, debido a su estructura molecular, el agua es un solvente casi universal, y esto la convierte en el elixir de la vida pues las membranas de las células son permeables sólo a las sustancias disueltas; el agua es pues fundamental en la nutrición y la remoción de desechos. El agua cumple este papel también a escalas mayores: a nivel de plantas, animales, hogar, ciudad y la tierra entera. El agua es un térmostato casi perfecto, un gramo de agua puede absorber más calor por aumento de un grado de temperatura que la mayoría de las sustancias. Este alto calor específico del agua le da una gran inercia térmica, que la convierte en el volante del motor térmico global. Este carácter especial del agua hace que la fluctuación de temperaturas en lagos, océanos y en el interior de plantas y organismos sea poca, protegiendo las proteínas que son muy sensibles a los cambios de temperatura. Adicionalmente, el agua es un intercambiador de calor insuperable: al cambiar de estado el agua absorbe o libera más calor latente que la mayoría de las sustancias; este mecanismo permite la redistribución de la radiación solar a través de la circulación atmosférica y así se mantiene un rango de temperaturas adecuados en casi todo el planeta. Esto es resultado y a la vez consecuencia de la cercanía del punto triple en el diagrama de cambios de fase del agua a las condiciones prevalecientes de temperatura y presión de la tierra, característica no compartida por ningún otro de los planetas del sistema solar.

El informe presenta cifras sobre tasas de mortalidad en los Estados Unidos entre 1941 y 1980 por causas asociadas a tormentas (2 muertes por millón de habitantes) y cifras sobre pérdidas económicas por inundaciones desde 1900 (del orden de 8000 millones de dólares para 1980). Se ilustran las cifras con historias de tragedias reales, incluyendo una crónica sobre la peste negra en Europa a mediados del siglo XIV que se atribuye a un deterioro de las condiciones de vida acompañado de un rápido crecimiento demográfico, deforestación, deterioro de los ríos, contaminación de las fuentes de agua y el efecto de la pequeña edad de hielo. En Colombia no tenemos las cifras aunque evidentemente si tenemos los problemas, las crónicas y el cólera.

El capítulo siguiente se concentra en una excitante descripción de los desafíos científicos que la hidrología enfrenta hoy. Las preguntas principales que permanecen abiertas en cada campo son introducidas mediante un corto ensayo que muestra además las perspectivas y la importancia de éstas. Este capítulo es tal vez la contribución más importante del Comité. Allí cada uno de los miembros del Comité presentó su campo, desde su perspectiva personal. Quienes tuvimos la oportunidad de conocer las primeras versiones de los ensayos y el cruce de comentarios y la seriedad del proceso crítico podemos testificar que en realidad el comité es el germen de la nueva ciencia en hidrología. Muy brevemente enumero los temas tratados, clasificados en siete grandes categorías:

- Hidrología subterránea: Papel del agua subterránea en los procesos tectónicos, ciclos de temblores, flujos a gran escala, transporte de solutos, flujo en medios fracturados, variabilidad espacial de características hidráulicas de acuíferos, modelamiento estocástico, flujo de solutos reactivos y contaminación.

- Hidrología y geoformas, predicción de la evolución del paisaje, evolución de cuencas y redes hidrográficas, geometría hidráulica y respuesta hidrológica, registro de cambio ambiental.
- Hidrología y procesos climáticos: Balance hídrico global, interacción superficie-atmósfera,sistemas convectivos y predicción de crecientes súbitas, caracterización de la variabilidad espacio-temporal de la lluvia.

- Hidrología y procesos superficiales; Variabilidad espacio temporal de las propiedades del suelo y su relación con la infiltración, producción de escorrentía, evaporación a nivel de cuencas zonas congeladas e hidrología de la nieve, evaporación de lagos y cuerpos de agua.

- Hidrología y comunidades vivientes: Explicación hidrológica de las fronteras entre las principales formas de vegetación, condiciones óptimas para el desarrollo de la vegetación, transformación microvial de contaminantes del agua.

- Hidrología y procesos químicos: Efectos de la lluvia ácida, química de la lluvia y la nieve, geoquímica del agua el suelo, transporte de contaminantes,ciclos globales de diversos componentes químicos de la atmósfera y los océanos.

- Hidrología y matemáticas aplicadas: Problemas de invarianza de escala en los procesos y campos hidrológicos, análisis estocástico de series y campos hidrológicos, predecibilidad y dinámica no lineal.

La actualidad de las discusiones sobre el llamado cambio climático global está representada en esta lista de áreas críticas seleccionadas por el comité. El llamado efecto invernadero, por ejemplo, tiene que ver con el estudio de

los ciclos geoquímicos del dióxido de carbono, con sus reacciones consumidoras y productoras en la fotosíntesis de la respiración, la oxidación y meteorización de las rocas que están en el centro mismo de la vida.

Son también muy importantes los ciclos del nitrógeno y del metano entre otros. El nitrógeno por ejemplo es base de los nutrientes para la comunidad acuática de plancton y zooplancton, pero su exceso puede iniciar la eutroficación de los cuerpos de agua. También es clave el nitrógeno en los procesos microbiológicos que se desarrollan en los suelos y allí el ciclo hidrológico cumple un papel primordial al determinar las condiciones de su transformación {oxi ó anoxi} que dependen de los tiempos de residencia del agua que lo transporta.

También muy relacionado con el cambio climático es el problema de la predecibilidad y la dinámica no lineal con atractores extraños y la teoría del caos. Todo indica que el clima y la hidrología son manifestaciones a escalas mayores de la turbulencia. Las implicaciones de esto sobre la predecibilidad y la estructura de los campos aleatorias resultantes está por determinarse. Ese nudo en el cual se entrelazan la dinámica determinista regida por las leyes de la física con los procesos estocásticos es tal vez uno de los mayores desafíos de la ciencia actual.

La mayoría de los temas son bastantes relevantes para Colombia, y algunos requieren mayor atención inmediata. Personalmente pienso que nuestra lista de prioridades comprende: el flujo subterráneo en medios fracturados, la hidrología de nuestras laderas andinas altamente meteorizadas, la geoquímica de esos flujos, la formación de los suelos y su relación con el ciclo hidrológico, la hidráulica de las avalanchas, la geomorfología de los ríos de alta pendiente, la calidad del agua en nuestras lagunas costeras, la meteorología tropical, el Fenómeno de El Niño, la hidrología de la selvas tropicales y el efecto de la deforestación. Todos estos temas están de una u otra manera en la lista del Comité. Pero también creo que hay que debatir un poco algunos temas menos convencionales y un poco más atrevidos:

- Manejo artificial del agua a gran escala en los suelos y/o sobre la superficie mediante manipulación de los parámetros de infiltración y almacenamiento de los suelos. Tanto la ingeniería de materiales como la química y la bioingeniería deberán aportar en este sentido.

- Cambio climático diseñado: Si la acción inadvertida del hombre puede cambiar el clima, el conocimiento de estos procesos debe permitir revertir y dirigir los cambios a voluntad. El diseño de la cobertura vegetal y el manejo del agua en suelos y demás depósitos aparecen como candidatos iniciales. De todas maneras, la experimentación y el conocimiento más profundo de la climatología, meteorología e hidrología a escala local, regional y global son requisitos para el éxito en esta dirección.

Respecto a la recolección, distribución y análisis de los datos hidrológicos hay una reflexión y un conjunto de recomendaciones importantes en el informe del Comité. Se insiste en la necesidad de unir y coordinar la observación y la teoría. Se constata que la recolección operacional de información hidrológica no responde necesariamente a los requerimientos científicos, sino más bien a las urgencias de aprovechamientos hidráulicos. A pesar de los esfuerzos hechos se requiere más datos, de mejor calidad, mayor cobertura espacial y longitud de registro sobre los siguientes aspectos:

- Flujos y almacenamientos de agua en todas las fases y componentes del ciclo hidrológico: precipitación, acumulación de nieve y hielo, flujo de glaciares, descarga en ríos y demás corrientes superficiales, humedad en suelos, flujos subterráneos, niveles freáticos, evapotranspiración. Transporte de sedimentos y solutos. Flujos de energía que mueven el ciclo hidrológico.

- Seguimiento del cambio en la cantidad y calidad del agua.

- Experimentos para verificación y prueba de hipótesis.

Los progresos en este campo vendrán a través de esfuerzos coordinados en experimentos especiales, avances tecnológicos en nuevos métodos de medición, instrumentación y sistemas de información, nuevas formas de análisis como el uso de isótopos, paleohidrología y mejores modelos espaciales y temporales. Es clara la necesidad de la coordinación internacional, el esfuerzo continuado por garantizar la calidad, el acceso y la estandarización de la información, en particular en los países no industrializados donde las deficiencias son más notorias. Por ejemplo, la lluvia tropical es una variable poco medida y por lo tanto es bastante desconocida su influencia a nivel global sobre la circulación atmosférica y los balances de energía. Nuevas generaciones de radares, el uso de sensores remotos para la medición de humedad en el suelo, evapotranspiración, topografía, cobertura vegetal, temperatura y otras variables, aparecen como los adelantos tecnológicos que seguramente van a contribuir a superar las limitaciones existentes.

Respecto a los países no industrializados, cabe aquí recordar la brecha tecnológica y los costos cada vez mayores de la información. Además hay que añadir que los beneficios de la juiciosa recolección y almacenamiento de datos no son inmediatos y que normalmente entran en competencia con otras necesidades más urgentes y apremiantes. Sin embargo, las clases dirigentes son cada vez más educadas y pueden apreciar la utilidad de la información, cuando se presentan bien sus beneficios y se justifican los gastos. Es conveniente recordarles que el gasto social en información básica no sólo compite con gastos sociales urgentes en educación y salud; también hay otros superfluos e incluso dañinos como la corrupción y el armamento. Aun así, es necesaria la ayuda y la cooperación internacional de los países industrializados como una compensación elemental por las responsabilidades en el cambio climático.

La educación en las ciencias hidrológicas es el siguiente tema de análisis del informe. La primera observación se refiere a que la educación avanzada de postgrado ha estado en manos de departamentos de ingeniería o geología y responde primordialmente a necesidades prácticas, tanto de investigación como de capacitación. Aunque se reconoce la validez e importancia de estos enfoques, se resalta la ausencia de la formación científica propiamente dicha; la distinción es semejante a la que hay entre la química y la ingeniería química. El Comité recomienda la creación de programas doctorales y de maestría en hidrología. Esta recomendación se discute en detalle, se considera la estructura departamental, disciplinaria y multidisciplinaria en las universidades y el curriculum de los programas. También se considera la formación a nivel de pregrado y se constata el hecho de que los profesionales vienen o de la ingeniería civil, la geología, la geografía y la ingeniería agrícola o forestal. Aunque se reconoce la importancia de estas profesiones, se recomienda una formación más integral en hidrología en cada una de ellas y en la medida de lo posible la aparición de la profesión de hidrólogo. Todo esto se enmarca en la necesidad de fortalecer la formación matemática y física, con exposición temprana a las principales preguntas abiertas, a los desarrollos recientes y a la experimentación y medición. Esto último debe extenderse en su medida a la formación secundaria, primaria y preprimaria. Se insiste también en la formación de una conciencia ambiental responsable.

Con respecto a Colombia cabe señalar cómo la muy reciente aparición de los estudios de posgrado da la oportunidad de atacar simultáneamente y con economía de recursos las necesidades prácticas ingenieriles y las preguntas científicas. Aquí nuevamente los desafíos para nosotros son mayores y más exigentes. La respuesta a esta aparente dicotomía entre la ciencia y la ingeniería se parece a la que hay que dar a la otra famosa entre la necesidad de la especialización del saber y los requerimientos multifacéticos, toderistas, de nuestro medio subdesarrollado. En los países avanzados hay abundancia de recursos para dedicar distintas personas a distintas especialidades y a distintos fines (aplicados o teóricos). A nosotros nos toca multiplicarnos en usos y especialidades. En la casa de un rico hay mesa de comedor, mesa de planchar, de estudio, de sala, de noche, etc. En la casa de un pobre la misma mesa de comedor es escritorio, planchadero, de trabajo etc. Toca. La clave es que haya mesa y que los que la usan para comer no impidan su uso como escritorio y viceversa.

## NOTA

1. National Research Council (U.S.). *Oportunities in the Hydrologic Sciences*. National Academy Press. 1991