

DESARROLLOS EVOLUTIVOS Y REVOLUCIONARIOS DE LA INGENIERÍA HIDRÁULICA

LUIS G. CASTILLO ELSITDIÉ¹
Universidad Politécnica de Cartagena

RESUMEN

En esta comunicación, en primer lugar se revisan los principales conceptos de la evolución cíclica de la economía y la ciencia, presentando las principales relaciones de la evolución de la ciencia con el crecimiento económico. Se identifican los campos de investigación punteros y secundarios, en función de las tendencias caracterizadas por la evolución y las condiciones favorables o desfavorables, establecidas por las políticas de investigación.

A continuación se presentan los eventos revolucionarios más representativos en los últimos cien años, desarrollos en el campo de la ingeniería hidráulica, asociados a la teoría de los ciclos económicos, así como también con los principios de la filosofía y teoría de la ciencia. Se identifica un nuevo Período de Crisis, que ha dado lugar a un Nuevo Paradigma en la Política Hidráulica, formulándose una propuesta que sea compatible con el desarrollo sostenible.

Finalmente, se identifican las principales líneas de investigación de la ingeniería hidráulica, tanto ahora como en el futuro inmediato.

1. INTRODUCCIÓN

En algunos sectores de la economía y de la ingeniería, se acostumbra a utilizar ciertas curvas, principalmente de tipo empírico, para describir la dinámica del desarrollo (Figura 1). La experiencia nos muestra que muchos desarrollos son casi regulares y principalmente cíclicos. Estos fenómenos son bien conocidos en ecología; así, el crecimiento sin restricciones de la población -conduce al aumento de la densidad poblacional- aumentando entonces la presión sobre el medio, lo que conduce a una disminución de la relación de crecimiento. Así, el crecimiento se aproxima asintóticamente a una "saturación". Pero en la interpretación de estas curvas, se debe realizar una distinción entre la saturación debida a la satisfacción de las demandas y a los problemas internos de crecimiento.

El ajuste conjunto de las Curvas "S" (curvas logísticas) representan a la evolución como una serie de sucesos. En esta forma Dobrov (2) describió el curso del desarrollo de la ciencia y la técnica con una "curva hipotética". En la Figura 2 se esquematiza "las tendencias características de la evolución", la que depende de las condiciones de las políticas de investigación.

El camino "I" corresponde a los campos de investigación punteros, en donde el inicio de una nueva investigación (puntos G) debe arrancar en los puntos de inflexión de la investigación anterior (puntos A, B, y D).

El camino "II" corresponde a los campos de investigación secundarios, en donde los inicios de las investigaciones (puntos C y E) arrancan demasiado tarde, en las fases de nulo crecimiento de la ciencia.

Un concepto similar fue explicado por Kuhn (3), describiendo el conocimiento científico en tres fases:

1. Período de "ciencia normal": La investigación se realiza en función del paradigma existente y el

¹ Profesor Titular de Obras Hidráulicas y Aprovechamientos Hidráulicos. e-mail: luis.castillo@upct.es

conocimiento científico se desarrolla acumulativamente; surgiendo las anomalías, más tarde o más temprano.

2. Período de "crisis": El paradigma se vuelve indefinido; aparecen teorías alternativas que intentan explicar las anomalías.
3. Período de "revolución": Innovación del conocimiento; transición a un nuevo paradigma.

Resumiendo, Kuhn caracterizó el desarrollo científico como una *sucesión de períodos tradicionales, separados por cambios no acumulativos*.

Los investigadores rusos: en economía Kondratieff (1925) y en ciencias Rainoff (1929), asociaron a las funciones "tipo fluctuación de onda", con el desarrollo; denominándose "Ciclos de Kondratieff". Posteriormente, algunos científicos en Estados Unidos, definieron este concepto en una forma más detallada, como Schumpeter en 1939.

La experiencia pasada demuestra que las innovaciones tecnológicas actúan como estimulantes del desarrollo económico; éste siempre se inicia como consecuencia de las innovaciones técnicas extraordinarias.

El concepto de los "Ciclos de Kondratieff" también describen bastante bien el desarrollo de la ciencia. Cada nueva teoría científica generalmente alimenta el núcleo del conocimiento contenido en las siguientes teorías. Figura 3.

2. DESARROLLOS EN LA HIDRÁULICA

Los desarrollos en la hidráulica también pueden ser representados con los Ciclos, distinguiéndose los "períodos de revolución" a partir de las "crisis". Figura 4.

Al final del último siglo, el desarrollo en Europa Central alcanzó un estado tal que, se necesitaron resolver esquemas hidrotécnicos de tal complejidad, que las teorías de la hidromecánica clásica y sus adaptaciones empíricas, resultaron ser inoperantes. El establecimiento de los laboratorios de hidráulica fue la respuesta adecuada a las necesidades y los problemas planteados por el desarrollo. Así, la modelación hidráulica respondió tanto a las necesidades de los estudios aplicados, así como a la investigación fundamental (características de flujo de canales y transporte de sedimentos). Esto generó una "innovación de la especialidad; una transición a un nuevo paradigma".

El nuevo paradigma aglutinó a un primer grupo de seguidores, tales como Engels, Rehbock, Fellenius, etc. La continua creación de nuevos laboratorios de investigación, ha contribuido al progreso de la hidráulica.

El concepto de la capa límite de Prandtl, sirvió de puente entre la hidromecánica teórica clásica y la hidráulica experimental práctica. Junto con los trabajos de Von Karmam, Nikuradse y muchos otros, la moderna mecánica de fluidos fue formulada como un nuevo paradigma.

Hasta la década de 1930, la hidrología permaneció como una ciencia llena de empirismo, con descripciones de tipo cualitativo y con poco entendimiento global del proceso continuo. En esa época, investigadores como Sherman y Horton iniciaron una aproximación más teórica y cuantitativa del fenómeno, ofreciendo explicaciones del comportamiento cuenca-río (5).

El gran impulso a las inversiones públicas en infraestructura hidráulica llevados a cabo en Estados Unidos, con el objeto de afrontar la "gran depresión económica", constituyó el origen de la hidrología moderna -el inicio de un nuevo "paradigma" científico-tecnológico.

De esta forma, el desarrollo de los diferentes ciclos evolutivos en el dominio de la ingeniería hidráulica siguen aproximadamente unas reglas muy similares a los "ciclos de los mercados" o a las leyes que controlan la dinámica de los grandes sistemas. Estos ciclos podemos interpretarlos de la siguiente forma:

Los eventos revolucionarios más representativos en los últimos cien años han sido: el establecimiento de los laboratorio de hidráulica, la unificación entre la mecánica de fluidos y la ingeniería hidráulica (teoría de la capa límite y modelos reducidos), el desarrollo de la hidrología moderna e hidroeinformática (transformación de información del dominio acuático como respuesta válida a los problemas de la ingeniería hidráulica), la conciencia de la escasez de los recursos naturales y preservación del medio ambiente (a través del "desarrollo sostenible").

En la actualidad, la aparición de nuevos actores y nuevos argumentos han conducido a un “Período de Crisis” en la política hidráulica tradicional, iniciándose la construcción de un nuevo consenso que establece un “nuevo paradigma de la política hidráulica” y cuyos principales contenidos se indican a continuación (6) (7):

- Sustitución de la política de incremento de la oferta de recursos hídricos, por una política equilibrada de control de la demanda
- Incentivos económicos en forma de precios y derechos limitados de comercialización del agua, combinando adecuadamente los instrumentos de control del estado y las reglas del mercado libre.
- Deliberación continua y ordenada de los problemas del agua en un gran espacio público, con intervención de los nuevos actores (ecologistas, comunidades autónomas, etc) y público en general.

En resumen, se formularía una *propuesta de política hidráulica que sea económicamente eficiente, políticamente viable, medioambientalmente razonable y consistente con un objetivo interregional*

Para poder desarrollar con éxito el nuevo paradigma de la ingeniería hidráulica dentro de los términos del desarrollo sostenible, se requiere de un conjunto equilibrado de políticas y reformas institucionales que aprovechen la eficiencia de las fuerzas del mercado y fortalezcan la capacidad del Estado en sus funciones fundamentales.

Puesto que el agua constituye un recurso estratégico de enorme peso específico en la economía de un país, su gestión debería interrelacionarse totalmente con las políticas económicas, científicas y tecnológicas. El grado de desarrollo del país y su productividad dependerán en gran medida en que dichas políticas fomenten y favorezcan la innovación tecnológica.

Finalmente, con la economía tradicional todavía vigente, los tres grande objetivos estratégicos para el desarrollo [Eficiencia – Equidad – Entorno (Medio Ambiente)] se encuentran en un continuo conflicto. Sin embargo, con el Desarrollo Sostenible se elimina dicho conflicto, puesto que los objetivos estratégicos se transforman en complementarios y cuya solución nos permitirá conseguir un equilibrio adecuado a nivel regional y mundial.

3. INVESTIGACIÓN ACTUAL Y FUTURA EN EL CAMPO DE LA HIDRÁULICA

La hidráulica moderna se beneficia de las posibilidades que ofrecen la microelectrónica y la informática. El encapsulamiento electrónico, el procesamiento de la información y el conocimiento en "hidroinformática", constituyen la esfera total de aplicación de la tecnología de la información en la ingeniería hidráulica.

El interés principal de investigación se centra en la solución de más y mejores técnicas para la gestión de los recursos, el avance del conocimiento de la mecánica de fluidos en los sistemas naturales y en la solución de problemas de calidad medioambiental, principalmente en el avance del conocimiento en los procesos de mezcla, transporte y transferencia interfacial, debiendo además intensificarse la participación de los ingenieros hidráulicos en las acciones sociales y de gobierno.

Para esto, se necesita ampliar la educación de los estudiantes, tanto a nivel de pre y postgrado, incluyendo asignaturas con tratamiento más profundo en geología, geomorfología, biología, transporte de sedimentos, sociología y ciencias medioambientales.

Se deben desarrollar programas de investigación que sean "socialmente relevantes" y conectados inequívocamente a las políticas de estado de los distintos organismos de los gobiernos. Las políticas de investigación deberían ser oportunas, relevantes, eficientes e integrados en las soluciones a los problemas medioambientales.

Se necesita realizar un mayor esfuerzo en el campo de la investigación aplicada, para lo cual se requiere una mayor interacción entre las universidades, los laboratorios estatales y las empresas del sector.

Los ingenieros hidráulicos necesitan ampliar e interactuar con otras disciplinas y desarrollar un interés en las áreas periféricas como la biología y química acuática, geología, geomorfología e hidrología. La ingeniería hidráulica puede y debería ser el área central que vincule todas estas ciencias involucradas con

el agua y sus interrelaciones y efectos con los diversos cambios en ríos, lagos, embalses, estuarios y sistemas costeros. Los ingenieros hidráulicos tienen la capacidad de modelar la mecánica del flujo y el transporte de sedimentos que son la base de muchos problemas medioambientales.

A continuación se presenta de acuerdo con el National Research Council (8) una lista parcial de los tipos de investigación que reflejan la filosofía de la hidráulica medioambiental:

- Efectos ambientales de la transferencia de agua a gran escala (por ejemplo el Plan Hidrológico Nacional).
- Efectos en las desembocaduras de los ríos por la introducción de desechos en sus cauces.
- Erosión en los fondos de los ríos urbanos por efecto de las técnicas de desarrollo y estabilización.
- Problemas de transporte de sedimentos, tales como los efectos de agradación y sedimentación por el dragado de materiales, erosión de márgenes, etc.
- Hidrodinámica de lagos, embalses y estuarios: herramientas y técnicas para estudiar de una forma integrada el sistema físico-biológico-químico.
- Transporte y destino de contaminantes, con especial atención a las fuentes de difusión.
- Efectos de fallo de los diseños hidráulicos y las probabilidades de ocurrencia que causan los fallos.
- Integración de la información hidrológica/hidráulica: Uso de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) para la integración de los elementos y procesos de cuencas.
- Cambio climático global en relación a los sistemas de abastecimiento de agua y naturales (ríos, estuarios y litorales).

Puesto que los problemas del agua exigen una participación multidisciplinaria, se necesitan estrategias adecuadas para financiar y desarrollar la investigación científica y tecnológica en este campo.

Seguidamente se resumen las principales conclusiones del Task Committee de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles para la defensa de la investigación en ingeniería hidráulica ASCE (9):

1. Necesitamos movilizarnos hacia los problemas más relevantes de investigación y saber comunicar dichos problemas y la urgencia de sus soluciones a las entidades que financian dicha investigación. La investigación académica no tiene con frecuencia suficiente contacto con las empresas de ingeniería del sector o con gente de otras disciplinas que están resolviendo problemas relevantes. En general, los ingenieros hidráulicos no tienen un adecuado contacto con otras disciplinas que también están involucrados con los problemas del agua.
2. Las condiciones del mercado imponen que las empresas del sector privado provean las soluciones con el "estado del arte" a los problemas planteados, en una forma rápida; esto es, que enfocan y resuelven los problemas en tiempo y costo eficiente. En el sector privado, especialmente las pequeñas empresas tienen sus objetivos de rentabilidad a largo plazo, y por tanto no pueden avanzar en el estado del arte. Así, el sector privado con frecuencia no tiene incentivos ni dispone de recursos para llevar a cabo las investigaciones a largo plazo. Las grandes empresas, sin embargo, pueden dedicar alguna parte de sus presupuestos para realizar investigación básica con implicaciones a largo plazo. Finalmente, debido a un comprensible motivo del beneficio, las empresas del sector privado son generalmente más reservadas que las agencias federales; esto es, existe una mínima participación de información y resultados.
3. Se necesita lograr un balance entre la investigación básica y aplicada. Las universidades están en mejor posición para hacer investigación básica a largo plazo, en tanto que los laboratorios estatales y las agencias de gobierno están mejor equipadas para hacer investigación aplicada.
4. La solución a estos problemas es la asociación entre las agencias estatales y locales, el sector privado y las academias (universidades, colegios profesionales, etc.). Estas asociaciones permitirán que cada grupo se nutra de los esfuerzos de los otros. El resultado será una investigación aplicada, oportuna y de calidad.
5. Se necesitan inversiones en investigación y entrenamiento a largo plazo. Este punto debe hacerse de una forma clara y convincente de tal forma que la investigación a nivel doctoral produzca graduados con la capacidad necesaria para enfrentarse a los problemas del siglo XXI.

6. Se necesita mostrar qué productos y qué tipo de personas emergerán desde este proceso, para el beneficio de los participantes.

Referencias bibliográficas

- (1) Glazik, G. (1996). Reflections cyclic developments and breakthroughs in hydraulics. IAHR Bulletin. Vol. 13. The Netherlands.
- (2) Dobrov, G.M. (1969). Wissenschaftswissenschaft. Akademie-Verlag, Berlin, (Original en ruso. Kiev 1966).
- (3) Kuhn, T.S. (1962). The structure of scientific revolutions. University of Chicago.
- (4) Hofman, E. (1985). Chancen und Gefahren des nachindustriellen Zeitalters. Schweizer Ingenieur und Architekt, N° 9, p.164.
- (5) Bras, R. (1990). Hydrology. An Introduction to Hydrology Science. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. Adisson-Wesley.
- (6) Pérez-D. V., Mezo, J. & Álvarez-M. B. (1996). Política y economía del agua en España. Círculo de Empresarios. Madrid. 1-155.
- (7) Castillo-E. Luis (1996). Problemática actual de la planificación de los recursos hidráulicos en España y el mundo. Tesis de Master en Ciencia, Tecnología y Sociedad. Facultad de Ciencias Económicas. Universidad Autónoma de Madrid.
- (8) National Research Council (1991). Opportunities in the hydrologic science. National Academic Press, Washington, D.C.
- (9) ASCE Task Committee on Hydraulic Engineering Research Advocacy (1996). Environmental Hydraulics: News Research Direction for the 21st Century. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 122, N° 4, April.

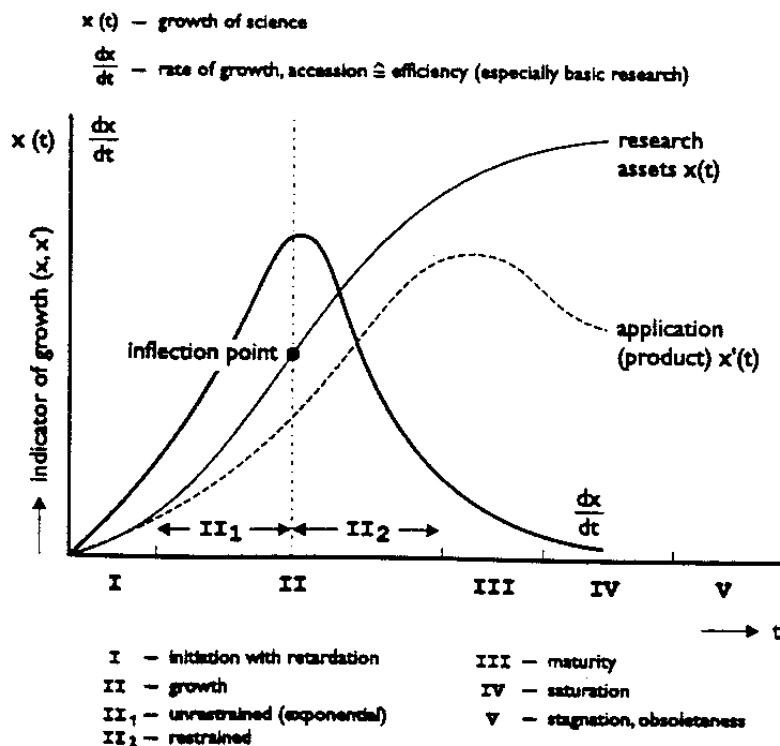


Figura 1. Relaciones de la evolución científica y técnica en función de la eficiencia y fases del ciclo de vida (1)

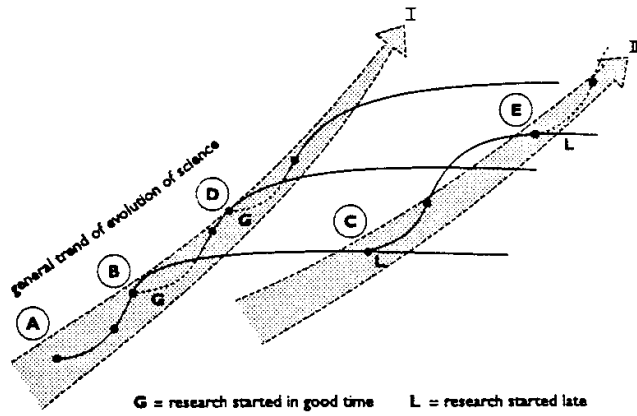


Figura 2. Tendencias características de la evolución de la ciencia (2)

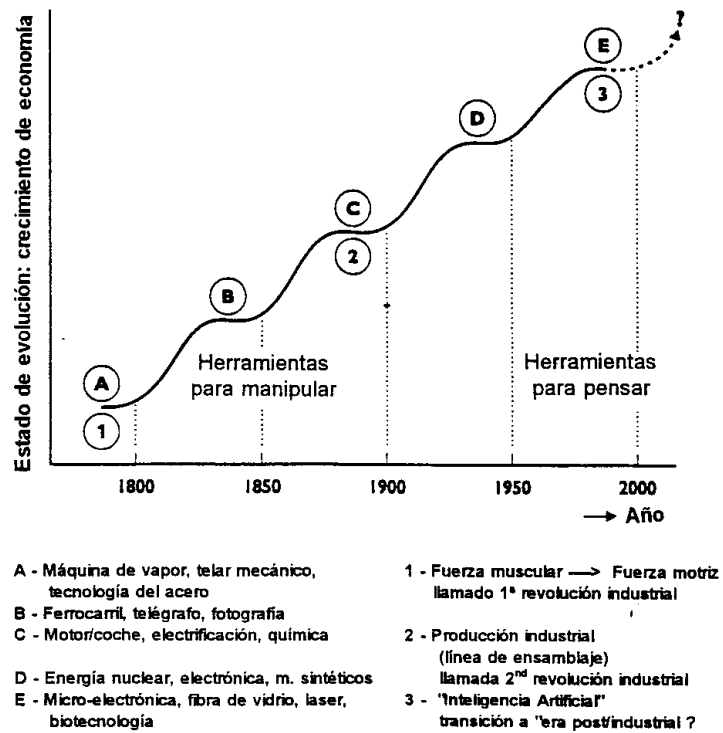


Figura 3. Relaciones de la evolución de la ciencia con el crecimiento económico. Adaptado desde Hofman (4)

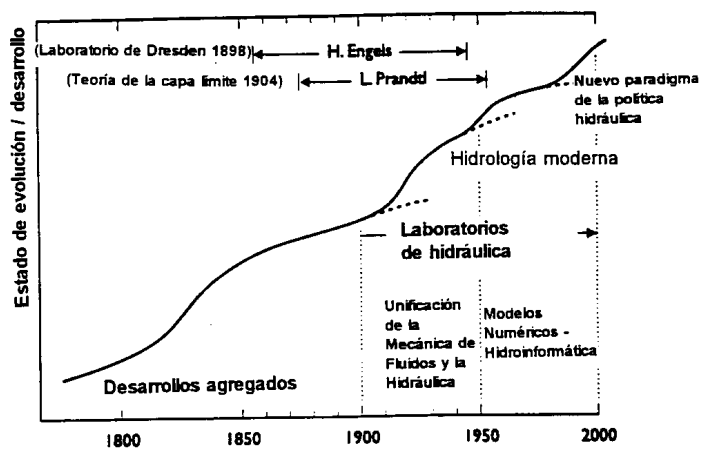


Figura 4. Desarrollo del dominio de la hidráulica como una serie de sucesos. Adaptado y complementado a Glazik (1)