

La Hidrología como Ciencia

Importancia de la definición de Hidrología

Desde un punto de vista metodológico, la presentación de una ciencia incluye una clara definición del objeto de su estudio, la discusión de las características de los fenómenos que tiene como objetivo explicar, y un análisis de las relaciones con otros conocimientos científicos.

En consecuencia, en este trabajo se presenta una definición de Hidrología, un análisis inicial de la asociación con problemas de la Ingeniería, y una discusión más amplia de las relaciones con otras ciencias y temas que presentan un conjunto de líneas abiertas de integración con otros conocimientos.

El término Hidrología hace referencia al estudio científico del agua, sus propiedades, distribución, y efectos sobre la superficie terrestre, el suelo, y la atmósfera.

La Hidrología es una ciencia que trata del agua en la Tierra, su ocurrencia y distribución, sus propiedades físicas y químicas, y su relación con el medio ambiente, que incluye su relación con los seres vivos.

Es una situación conocida que los objetos de estudio de una ciencia se modifican con el paso del tiempo, y en consecuencia resulta conveniente como guía de este análisis discutir los temas actuales en estudio y los posibles escenarios futuros.

Las características de los estudios que se desarrollen en el marco de la Hidrología serán diferentes según el enfoque profesional y las distintas bases de conocimientos que sean utilizados en la resolución de problemas técnicos, desarrollos, o investigaciones.

Un **problema central** a resolver con las distintas metodologías científicas que se utilizan, apunta a **explicar y predecir las variaciones en la distribución temporal y areal del agua.**

En la relación con la Ingeniería aparece definida la necesidad de realizar predicciones acerca de la disponibilidad del agua, y en este tema se asocia la Hidrología con las necesidades propias de los diseños de obras hidráulicas.

Problemas en los diseños de obras y factores de riesgo

En este párrafo se discute una presentación clásica del origen de los problemas en el diseño de obras civiles, y se presenta un análisis que se centra en los diferentes modelos utilizados para la explicación de los procesos físicos.

Según McCuen (1989), entre los principales factores que contribuyen a que los diseños de las obras civiles puedan resultar ineficaces, se encuentran:

- **La ocurrencia de la precipitación no es pronosticable**

En la actualidad no es posible predecir exactamente cuánta precipitación ocurrirá en un determinado período de tiempo (día, mes, año) y espacio. Esta característica define una primera dificultad en los proyectos de Ingeniería para controlar el escurrimiento bajo todas las condiciones posibles de variación espacial y temporal del agua, a partir del concepto de que existen distintas fuentes de incertidumbre asociadas a: 1) la propia del fenómeno bajo análisis (en este caso, la precipitación), 2) la debida a la selección del modelo matemático, y 3) la debida a la estimación de los parámetros del modelo.

En este punto debe aparecer claramente definida una primera asociación con los objetos de estudio de otras ciencias. En este caso la Meteorología (por ejemplo: tipos de precipitación) y la Estadística con modelos estocásticos (o sea, probabilísticos) para la representación puntual y areal de la precipitación.

- **Costos de las obras para asegurar el control total**

Desde un enfoque más práctico, obras cuyos parámetros de diseño permitan controlar totalmente estas variaciones tendrían un costo muy elevado, por lo tanto, aparece la necesidad de establecer criterios adecuados para seleccionar los proyectos más eficientes, utilizando técnicas objetivas para su identificación.

En este punto aparece claramente definida una nueva asociación con la Planificación y la Investigación Operativa, que proveen los modelos matemáticos necesarios para optimizar el proceso de selección de las obras y la definición de sus parámetros de diseño.

- **Los procesos hidrológicos son muy complejos**

En consecuencia, no existe una teoría completa –y por lo tanto continua– para describirlos, ya que existe una marcada dependencia con las mediciones de numerosas variables hidrometeorológicas de diseño.

En este punto, se debe contemplar la necesidad de contar con teorías científicas que permitan realizar predicciones con menores niveles de incertidumbre, utilizando modelos explicativos cuyas aplicaciones sean bien conocidas.

En los últimos años se puede observar la presencia de una nueva familia de modelos matemáticos que tienen como objetivo explicitar los procesos físicos y producir una respuesta en términos probabilísticos.

Relación con otras ciencias

Los nexos entre la Hidrología y otras ciencias de la Tierra, como la Meteorología, la Ecología, la Geología y la Oceanografía, surgen de la natural complejidad del ciclo hidrológico y su relación con los fenómenos meteorológicos, tipos de suelo, topografía y otros factores geológicos. Esta complejidad hace que los límites entre las ciencias mencionadas sean difíciles de definir, ya que dificulta el establecimiento de claras condiciones de borde entre los conocimientos.

Hidrometeorología: estudia la presencia y evolución del agua en la atmósfera.

Limnología: estudio del agua en lagos y embalses.

Potamología: estudio de ríos y arroyos.

Glaciología: estudio de la nieve y el hielo en la naturaleza.

Hidrogeología: estudio y modelación del agua subterránea.

El ciclo hidrológico y las modificaciones en el escurrimiento

El ciclo hidrológico de un ambiente natural puede presentar alteraciones debidas principalmente a la erosión, ya que las tormentas de alta intensidad causan erosión sobre la superficie, y los caudales extremos que se producen a partir de tormentas de gran volumen producen caudales de alta velocidad en los cursos, con la posibilidad de erosionar el canal de escurrimiento.

Por otro lado, en épocas de sequías extremas puede ocurrir un aumento de las superficies desérticas, es decir,

desaparición de vegetación, con el consiguiente aumento del escurrimiento superficial y la disminución de la capacidad de almacenamiento de la cuenca.

Conclusión: aún en un ambiente natural, la precipitación y su caudal asociado producen cambios en las características de las cuencas.

El ciclo hidrológico en ambientes modificados por el hombre

El suelo destinado a la agricultura presenta una menor capacidad de infiltración, y por lo tanto una disminución de la capacidad de almacenamiento, con el consiguiente aumento de escurrimiento superficial.

Los principales efectos de la urbanización aparecen al reducirse la vegetación y la posibilidad de almacenamiento en depresiones. Las superficies impermeables reducen drásticamente la capacidad de infiltración del suelo y como dichas superficies son menos rugosas se incrementa considerablemente la velocidad de los caudales, lo que provoca una mayor erosión superficial aguas abajo, en áreas no urbanizadas.

El aumento del escurrimiento superficial y de la velocidad de los caudales, produce un incremento de los caudales máximos, con los consiguientes fenómenos de erosión de los canales y las pérdidas económicas por inundación.

En consecuencia aparece la necesidad de realizar obras que permitan compensar la pérdida de almacenamiento natural, con lo que la urbanización trae aparejada la realización de obras de ingeniería en pos de esos objetivos.

Ejemplos clásicos de problemas a resolver en Ingeniería Hidrológica:

- Estimación de caudales extremos para vertederos.
- Capacidad de almacenamiento en embalses para riego y agua potable.
- Efectos de la construcción de embalses sobre los caudales aguas abajo.
- Definición de los efectos del desarrollo urbano sobre la capacidad futura de los sistemas de drenaje y caudales asociados.
- Delimitación de planicies de inundación y proyectos para la protección y mejor zonificación de superficies eventualmente inundables.

La resolución de problemas en Ingeniería implica definir relaciones analíticas entre las variables que caracterizan los procesos de entrada y salida del sistema, y de aquellas que definen los correspondientes estados del sistema.

Distintos autores indican que la formulación de las ecuaciones necesarias para representar un proceso físico puede resultar inadecuada por al menos alguna de las siguientes causas:

- Conocimiento inadecuado del comportamiento físico del proceso.
- Heterogeneidades desconocidas del sistema.
- Dependencia temporal desconocida de los parámetros del sistema.
- Aproximaciones introducidas por economía computacional.

En general se puede afirmar que en un análisis metodológico clásico, existen dos enfoques dominantes: uno **determinístico** y otro **estocástico**; y ambos se utilizan frecuentemente para resolver los problemas hidrológicos que, de acuerdo con la escala temporal de Eagleson (1979), pueden ser clasificados en:

Valores medios: son problemas relacionados con la planificación de recursos hídricos. Se involucran promedios en niveles temporales (estacionales, mensuales y/o anuales) de variables tales como la

precipitación, el caudal, o la evaporación.

Valores extremos: son problemas relacionados con alturas máximas o mínimas. Se involucran picos y mínimos de variables tales como la precipitación y el caudal, que determinan el criterio económico de las especificaciones hidráulicas de vertederos o volúmenes de embalses, trabajos para riego, y cualquier otro problema relacionado con el diseño.

Serie temporales: son problemas relacionados con el diseño y operación de sistemas de estructuras hidráulicas, así como con el pronóstico de variables en tiempo real. Frecuentemente se requiere la historia definida por la serie temporal de la respuesta del sistema hidrológico a una determinada excitación.

Modelos matemáticos estocásticos y determinísticos

La idea de usar un modelo matemático para describir el comportamiento de un fenómeno físico es bien conocida, y en particular la posibilidad de derivar modelos basados en leyes físicas que permitan calcular variables que dependen del tiempo exactamente para cualquier instante. Si este cálculo es posible se puede afirmar que el modelo es enteramente **determinístico**.

Existen otros procesos donde el fenómeno depende del tiempo y hay muchos factores desconocidos, por lo que no es posible describirlo con un modelo determinístico. Sin embargo, es posible derivar un modelo probabilístico que se puede usar para calcular la probabilidad de que un valor futuro se encuentre entre dos límites especificados. Este tipo de modelo se denomina **estocástico**.

Cuando el mecanismo del fenómeno es completamente entendido y es posible escribir una expresión matemática que lo describe completamente, se obtiene un **modelo teórico**.

Una limitación en el uso de este enfoque es que existen casos en que se necesita una experimentación demasiado compleja para producir un modelo teórico, y entonces resulta necesario aceptar un **modelo empírico**.

Los modelos que se emplean en la actualidad permiten utilizar un conocimiento teórico incompleto y sus parámetros pueden ser estimados utilizando un ajuste empírico. Así se obtiene el número de términos necesarios y los valores numéricos de los parámetros necesarios para el modelo, que son estimados a partir de datos experimentales (es decir, empíricos).

Los pasos para construir modelos con este enfoque son los siguientes:

- A partir de la interacción entre la teoría y la práctica, seleccionar una clase de modelo para cumplir con los objetivos.
- Utilizando métodos de identificación basados en los datos y el conocimiento del sistema, identificar una subclase de estos modelos. La identificación inicial es tentativa y se puede utilizar para definir los parámetros iniciales del modelo.
- Ajustar un modelo tentativo a los datos y estimar sus parámetros. Los valores estimados en el paso anterior pueden ser usados como valores iniciales para estimar los parámetros del modelo tentativo con métodos más refinados.
- Verificar el modelo con el propósito de detectar problemas en el ajuste y, si es necesario, modificar el modelo inicialmente propuesto.

Objetivos del análisis de las series temporales

- **Pronóstico de series temporales**

Consiste en la predicción de los valores futuros a partir de los valores pasados y presentes, y se puede realizar con modelos univariados y multivariados.

En este enfoque las series temporales deben estar constituidas por observaciones equiespaciadas en el tiempo, y existe un tiempo de adelanto óptimo (lead time) para la predicción, que depende de cada problema.

Una ventaja de este enfoque es que la precisión de los pronósticos se expresa calculando los límites de probabilidad de la predicción.

- **Estimación de funciones de transferencia**

Consiste en identificar y estimar funciones que permiten la transformación de una serie temporal de entrada, en una serie de salida.

Una importante aplicación de las funciones de transferencia es la relación dinámica que existe entre dos series de tiempo, que puede ser determinada para usar los valores pasados y presentes de ambas series para la predicción.

Se trata de dos o más series. Ejemplo: regresión lineal y no lineal múltiple.

- **Diseño de sistemas de control**

Son sistemas donde se estudian problemas de feedback que tratan de definir por qué ocurren cambios en las series temporales, a partir de haber identificado cuándo ocurren esos cambios.