

Fundamentos de Hidrología

*Conceptos esenciales para
estudiantes e ingenieros*

Una guía introductoria con 46 conceptos organizados por temáticas: precipitación, cuencas, escorrentía, aguas subterráneas, eventos extremos, sedimentos, glaciología e infraestructura hídrica. Con apéndices de referencia y bibliografía especializada.

Pablo Ignacio Rojas Torres

Ingeniero Civil · Universidad de La Serena, Chile

46 conceptos · 11 partes · Tablas de referencia

Primera edición
2026

Fundamentos de Hidrología

Conceptos esenciales para estudiantes e ingenieros

Primera edición, 2026

Autor: **Pablo Ignacio Rojas Torres**

Ingeniero Civil · Universidad de La Serena, Chile

Sitio web: www.ingeciv.com

Pablo Ignacio Rojas Torres es Ingeniero Civil de la Universidad de La Serena, Chile, con más de 10 años de experiencia en gestión, modelación y administración de recursos hídricos. Es fundador de ingeciv.com, plataforma de divulgación técnica en ingeniería civil e hidrología.

El contenido de este libro ha sido compilado y redactado a partir de fuentes académicas y técnicas reconocidas a nivel internacional, incluyendo publicaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM/WMO), el USDA-NRCS, la FAO, el USGS y los textos clásicos de hidrología aplicada.

Las fuentes de cada capítulo se indican al final del mismo. La bibliografía general se incluye en el Apéndice C.

Este trabajo se distribuye bajo licencia **Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**.

Usted es libre de compartir y adaptar el material, siempre que cite la fuente (ingeciv.com), no lo use con fines comerciales y distribuya las obras derivadas bajo la misma licencia.

Las imágenes utilizadas provienen de Wikimedia Commons y son de dominio público o tienen licencia libre. Los créditos individuales se consignan en el sitio web.

Prólogo

El agua es el recurso más fundamental de la civilización humana. Sin embargo, su comportamiento en la naturaleza — cómo cae, cómo fluye, cómo se almacena, cómo se pierde — sigue siendo un desafío intelectual y técnico de primera magnitud para ingenieros, geógrafos, agrónomos y gestores ambientales en todo el mundo.

Este libro nació como un diccionario en línea en ingeciv.com: un espacio donde publicar, de manera accesible y rigurosa, los conceptos fundamentales de la hidrología. Con el tiempo, ese diccionario creció hasta abarcar 46 entradas que cubren desde la precipitación y la escorrentía hasta la glaciología, los modelos climáticos globales y la infraestructura de riego.

La presente edición reúne y ordena ese material en un formato de libro, añadiendo introducciones temáticas, tablas de referencia y una bibliografía consolidada. No pretende ser un tratado exhaustivo — para eso existen obras como el *Applied Hydrology* de Chow, Maidment y Mays, o el *Open-Channel Hydraulics* de Chow —, sino una **guía introductoria estructurada** para quien se inicia en la disciplina o necesita refrescar conceptos de manera rápida y confiable.

El libro está organizado en once partes que siguen la lógica del ciclo hidrológico: comenzamos con la definición de la ciencia y el ciclo del agua, avanzamos por la precipitación, las cuencas, el suelo, la escorrentía, la hidráulica y los eventos extremos, y terminamos con la tecnología y los modelos que definen el futuro de la gestión hídrica.

Cada capítulo incluye una definición precisa, el contexto físico del fenómeno, las ecuaciones o métodos asociados cuando corresponde, y las referencias bibliográficas que permiten profundizar. Los apéndices concentran las tablas de referencia más utilizadas en la práctica profesional.

Esperamos que este aporte contribuya a la formación de quienes trabajarán con el agua — el recurso que define, más que ningún otro, el futuro del planeta.

Pablo Ignacio Rojas Torres
Ingeniero Civil, ingeciv.com
La Serena, Chile · 2026

Índice de Contenidos

PARTE I: INTRODUCCIÓN A LA HIDROLOGÍA

1. Definición de Hidrología
2. El ciclo del agua
3. ¿Qué es la hidrología superficial?

PARTE II: PRECIPITACIÓN Y CLIMATOLOGÍA

4. ¿Qué es la precipitación?
5. ¿Qué es el fenómeno de la coalescencia?
6. ¿Qué es la lluvia de diseño?
7. Temperatura de la superficie del mar

PARTE III: CUENCAS HIDROGRÁFICAS

8. ¿Qué es una cuenca hidrográfica?
9. ¿Cuáles son los tipos de Cuencas Hidrográficas?
10. ¿Qué es una curva hipsométrica?

PARTE IV: AGUA EN EL SUELO

11. ¿Qué es la infiltración?
12. ¿Qué es la humedad del suelo?
13. ¿Qué es la permeabilidad del suelo?
14. ¿Qué es la evapotranspiración?
15. ¿Qué es el balance hídrico?

PARTE V: ESCORRENTÍA, CAUDAL E HIDRÁULICA

16. ¿Qué es la escorrentía superficial?
17. ¿Qué es el número de curva (CN)?
18. ¿Qué es el tiempo de concentración?
19. ¿Qué es el caudal?
20. ¿Qué es el aforo de caudales?
21. ¿Qué es un hidrograma?
22. ¿Qué es la ecuación de Manning?

PARTE VI: EVENTOS EXTREMOS E INUNDACIONES

23. ¿Qué es el período de retorno?
24. ¿Qué es una inundación?

PARTE VII: AGUAS SUBTERRÁNEAS

- 25. ¿Qué es un acuífero? ¿Qué tipos de acuíferos hay?
- 26. ¿Qué es el nivel freático?

PARTE VIII: SEDIMENTOS Y EROSIÓN

- 27. ¿Qué es la erosión hídrica?
- 28. ¿Qué es el sedimento en suspensión?

PARTE IX: GLACIOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE NIEVE

- 29. Qué son los glaciares de alta montaña
- 30. Qué son los glaciares polares
- 31. Qué son los glaciares tropicales
- 32. ¿Qué son los glaciares de roca?
- 33. Qué es la sublimación de la nieve
- 34. Qué son las barreras de nieve
- 35. ¿Qué son los penitentes?
- 36. Qué es el bombardeo de nubes y para qué se puede usar

PARTE X: CUERPOS DE AGUA, ZONAS ESPECIALES E INFRAESTRUCTURA

- 37. ¿Qué es un estero?
- 38. ¿Qué es una laguna costera?
- 39. ¿Qué es el ciclo hidrológico urbano?
- 40. ¿Qué es una acequia?
- 41. ¿Qué es una noria (pozo)?
- 42. ¿Qué es una Junta de Vigilancia?
- 43. ¿Qué es un canal de riego?

PARTE XI: TECNOLOGÍA, MODELOS Y EL FUTURO DEL AGUA

- 44. ¿Qué es un Modelo GCM - Modelos de Circulación General?
- 45. Hidroinformática: El H2O Digital que Revoluciona el Mundo

APÉNDICES

- A. Valores del coeficiente n de Manning
- B. Valores del Número de Curva (CN) — Método SCS/NRCS
- C. Bibliografía general
- D. Glosario de términos

PARTE I

Introducción a la Hidrología

La hidrología es la ciencia que estudia el agua en la Tierra: su distribución, movimiento y propiedades. Comprender sus fundamentos es el primer paso para cualquier ingeniero, científico o gestor del agua.

CAPÍTULO 1

Definición de Hidrología



Según el Federal Council for Science and Technology:

La hidrología versa sobre el agua de la Tierra, su existencia y distribución, sus propiedades físicas y químicas, y su influencia sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos. El dominio de la hidrología abarca la historia completa del agua sobre la Tierra.

CAPÍTULO 2

El ciclo del agua



El agua es el factor que diferencia drásticamente a la tierra de los otros planetas, aunque el suministro total del agua se ha mantenido constante durante millones de años, nunca se mantiene estacionaria, es el material más activo de la Tierra y eso es lo que veremos en esta entrada, el ciclo del agua.

El agua se mueve constantemente, su movimiento se debe a las formas que tiene la superficie de la tierra. En Islandia el agua dulce sale a través de las piedras cruzando a través del terreno en un viaje descendente hacia el océano atlántico. Pero el agua dulce es una pequeña parte del suministro total en la tierra, la mayor parte del agua de la tierra más del 97% está en los océanos, de hecho casi el 71% de la superficie de la tierra está cubierta por agua salada.

El agua dulce es almacenada en glaciares cerca de los polos norte y sur, en climas cálidos el hielo se derrite y corrientes de agua dulce desembocan en el océano. El agua dulce se encuentra en lagos, riachuelos y en la tierra. El resto del suministro de agua se encuentra en las nubes, la cantidad de agua en la atmósfera es pequeña, cuando se compara con la cantidad que hay sobre la superficie.

Las nubes se forman de la evaporación del agua y se condensa cuando el aire se enfría. El agua regresa a la tierra en forma de precipitación, la forma más común de precipitación es la lluvia. Este intercambio de agua entre la tierra mar y aire **se conoce como el ciclo del agua** pero:

¿de dónde viene el agua? ¿Cómo llega al aire? ¿Qué hace que el agua regrese a la tierra?
¿como es el ciclo del agua?

El agua se evapora del océano a la atmósfera, el viento lleva el vapor de agua por la tierra donde se condensa para formar nubes. La precipitación ocurre cuando el agua cae sobre la tierra, fluye sobre y debajo de la tierra de regreso al océano, esto completa el ciclo del agua.

El agua se evapora de diferentes modos, en el parque nacional de Yellowstone el agua subterránea se calienta a grandes profundidades y regresa formando manantiales, cuando el agua hierve aparecen burbujas que suben y se rompen en la superficie. Las burbujas no son aire, pero contienen vapor de agua, un gas invisible. No podemos ver el vapor de agua, pero si el vaho, el vaho son gotitas de agua caliente antes de convertirse en vapor, pero no toda hierve para entrar en la atmósfera.

Por ejemplo en el lago Grint Salt en Utah, el calor del sol seca los estanques de agua salada, el agua se convierte en gas por el proceso de evaporación, grandes cantidades de agua son devueltas a la atmósfera diariamente por los océanos la tierra y la vegetación, el agua se evapora sube y se condensa para formar nubes, estas nubes están formadas por millones de gotitas de agua condensada, el vapor de agua viaja en las corrientes de aire hasta que se enfría y se condensa, podemos ver humedad en el aire, en estas montañas la niebla se desarrolla a medida que el vapor de agua se condensa, cuando el aire tibio pasa sobre la montaña fría las partículas de vapor se condensan en partículas pequeñas y forman gotas de agua.

La niebla es una nube que permanece cerca de la tierra a menos de 100 metros de altura, evidencia de condensación puede observarse en la costa a primera hora de la mañana, pequeñas partículas de polvo y sal que están en el aire recogen el vapor de agua el agua se condensa en gotitas, esta condensación se conoce como rocío.

La condensación trae humedad a muchas formas de vida, pero no recoge mucha agua de la atmósfera, la mayor parte del agua que se extrae del aire es en forma de precipitación,

como lluvia, granizo y nieve. También se forman riachuelos, en ciertas regiones, el invierno almacena temporalmente el agua dulce como hielo, al derretirse el hielo se une con otras aguas en movimiento, cuando el suelo bajo la nieve se congela y el agua se derrite, corre. En cambio si el suelo bajo la nieve no está congelado, el agua derretida penetra la tierra y forma parte del suministro de agua de la tierra.

El agua se acumula bajo la superficie de la tierra en los poros del suelo y las rocas, esto forma agua subterránea con zonas de saturación, el límite superior de la zona de saturación se llama nivel hidroestático.

En el monte Rainier, las grandes masas de hielo y nieve almacenan enormes cantidades de agua dulce, en las zonas frías, sólo cae una pequeña cantidad de nieve, porque el aire frío tiene poco vapor de agua, en este lugar los glaciares se han formado debido a la lentitud de la evaporación, hay tanta agua almacenada en los glaciares que si todos huyen o se derritiera, la superficie de los océanos subiría 60 metros, aunque el derretimiento es lento, el movimiento de las aguas se puede ver en el paisaje.

En su paso por la tierra el agua recoge pequeñas partículas de tierra y rocas llamadas sedimentos, los ríos también disuelven los materiales de sus orillas, casi todo el material de la tierra se puede disolver en agua. Por la gravedad, algunas de estas partículas de roca y tierra se quedan en el fondo, donde forman depósitos de sedimentos, pero el agua que corre se une con otros en riachuelos y ríos siguiendo un camino descendente convirtiéndose en grandes masas de agua. Parte de esta agua regresa finalmente al océano, su lugar de origen, pero, ¿qué pasa con el agua que no regresa al mar? una pequeña parte de agua subterránea puede ser vista en yellowstone, aquí el agua bajo la superficie hierve y es enviada de nuevo a la superficie, la evidencia de agua subterránea es vista a medida que se vierte el agua del manantial en los precipicios durante un período de sequía sin precipitaciones el agua subterránea puede fluir a los riachuelos.

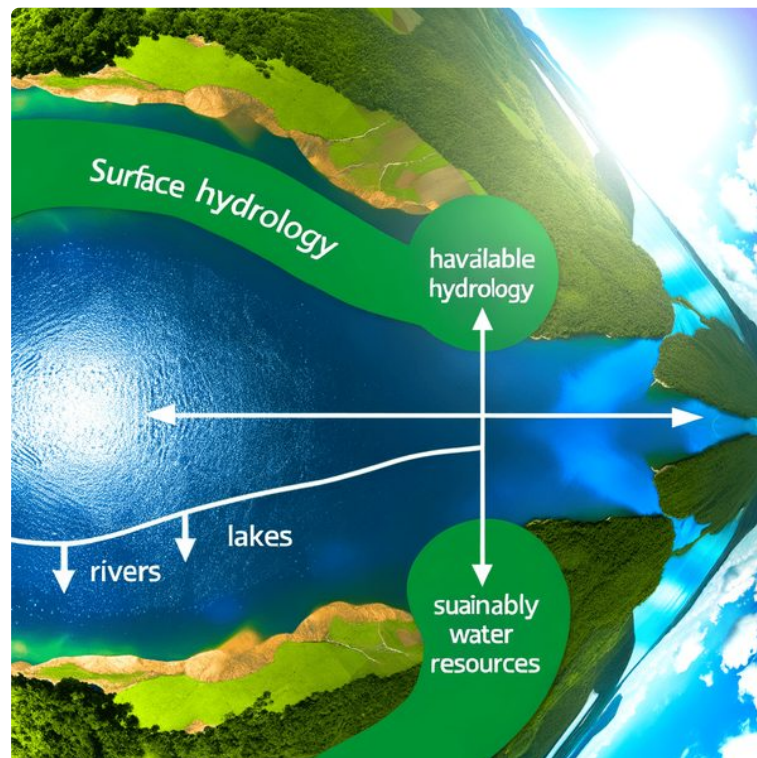
Los científicos estiman que una molécula de agua pasa 98 años de cada 100 en el océano, durante el resto del tiempo el agua está año y medio como hielo, alrededor de un mes en lagos y ríos y menos de una semana en la atmósfera. El agua regresa al océano completando así su viaje en el ciclo del agua.

La función del ciclo del agua en cualquier localización depende de su cercanía a océanos, montañas y a la latitud.

CAPÍTULO 3

¿Qué es la hidrología superficial?

La hidrología superficial estudia el agua en la superficie terrestre.



¿Qué es la hidrología superficial?

La hidrología superficial es una rama de la hidrología que se centra en el estudio de las aguas que se encuentran en la superficie terrestre, como ríos, lagos, arroyos y embalses. Esta disciplina es fundamental para entender los procesos que afectan la disponibilidad y calidad del agua, así como para la gestión sostenible de los recursos hídricos. En este artículo, exploraremos la definición y relevancia de la hidrología superficial, así como los componentes clave del ciclo hidrológico superficial.

Definición y Relevancia de la Hidrología Superficial

La hidrología superficial se refiere al estudio científico de la distribución, movimiento y propiedades del agua en la superficie terrestre. Este campo analiza cómo el agua de lluvia y otras formas de precipitación se convierten en escorrentía superficial, infiltración y almacenamiento en cuerpos de agua superficiales. La hidrología superficial incluye el estudio de los procesos físicos, químicos y biológicos que influyen en el comportamiento del agua en la superficie terrestre. La relevancia de la hidrología superficial es múltiple y abarca diversas áreas de interés. En primer lugar, es esencial para la planificación y gestión de los recursos hídricos, permitiendo una mejor comprensión de la disponibilidad de agua para diferentes usos, como el consumo humano, la agricultura y la industria. Además, la hidrología superficial es crucial para la gestión de riesgos relacionados con inundaciones y sequías, ayudando a prever y mitigar los impactos negativos de estos eventos extremos. Otra área de relevancia es la protección del medio ambiente y la preservación de los ecosistemas acuáticos. La calidad del agua superficial puede verse afectada por diversas actividades humanas, como la agricultura, la urbanización y la industria. La hidrología superficial proporciona las herramientas y conocimientos necesarios para monitorear y mejorar la calidad del agua, asegurando así la salud de los ecosistemas y la biodiversidad asociada.

Componentes Clave del Ciclo Hidrológico Superficial

El ciclo hidrológico superficial consta de varios componentes interconectados que describen el movimiento del agua desde la atmósfera hasta la superficie terrestre y de regreso a la atmósfera. Uno de los componentes principales es la precipitación, que incluye todas las formas de agua que caen del cielo, como lluvia, nieve y granizo. La precipitación es la fuente primaria de agua para los cuerpos de agua superficiales y su magnitud y distribución espacial y temporal son factores determinantes en el ciclo hidrológico superficial. La escorrentía superficial es otro componente clave y se refiere al agua que fluye sobre la superficie del suelo, dirigiéndose hacia ríos, arroyos y otros cuerpos de agua. La escorrentía se produce cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo, y su magnitud puede verse influenciada por factores como la topografía, la cobertura del suelo y el uso del suelo. La escorrentía juega un papel crucial en el transporte de sedimentos, nutrientes y contaminantes hacia los cuerpos de agua superficiales. El almacenamiento superficial incluye todos los cuerpos de agua en la

superficie terrestre, como lagos, embalses y humedales, que actúan como reservorios temporales de agua. Estos depósitos naturales y artificiales regulan el flujo de agua a lo largo del tiempo, ayudando a mantener un suministro constante durante períodos de baja precipitación. Además, el almacenamiento superficial tiene implicaciones importantes para la ecología y la gestión de los recursos hídricos, proporcionando hábitats esenciales para diversas especies y facilitando el acceso al agua para diferentes usos humanos. En resumen, la hidrología superficial es una disciplina vital para el entendimiento y la gestión de las aguas superficiales. A través del estudio de la precipitación, la escorrentía y el almacenamiento, esta rama de la hidrología proporciona conocimientos esenciales para abordar desafíos relacionados con la disponibilidad y calidad del agua, la mitigación de desastres naturales y la conservación del medio ambiente. La hidrología superficial no solo nos ayuda a comprender mejor el ciclo del agua en la superficie terrestre, sino que también nos permite tomar decisiones informadas para un uso sostenible y responsable de este recurso invaluable.

PARTE II

Precipitación y Climatología

La precipitación es la entrada principal de agua dulce al ciclo hidrológico terrestre. Su análisis — desde la formación de gotas hasta el diseño de tormentas — es la base del cálculo hidrológico.

CAPÍTULO 4

¿Qué es la precipitación?

La precipitación es la principal entrada del ciclo hidrológico. Conoce sus tipos, cómo se mide y los parámetros clave para el diseño hidráulico.

La precipitación es toda forma de agua atmosférica que alcanza la superficie terrestre: lluvia, llovizna, nieve, granizo o escarcha. Es la **principal entrada del ciclo hidrológico** y el motor que impulsa la escorrentía, la infiltración y la recarga de acuíferos. Sin precipitación no hay hidrología.

nn

Tipos según su origen

n

n

– **Convectiva:** masas de aire cálido y húmedo ascienden bruscamente, se enfrían y condensan. Genera tormentas intensas y localizadas, comunes en verano y en zonas tropicales.

n

– **Orográfica:** el viento empuja aire húmedo contra una cadena montañosa, forzando su ascenso y condensación en las laderas de barlovento. Muy relevante en Chile, Perú y toda la región andina.

n

– **Frontal o ciclónica:** se produce en la zona de contacto entre masas de aire frío y cálido. Origina lluvias prolongadas de baja a moderada intensidad, típicas del invierno en zonas templadas.

n

nn

Cómo se mide

n

El instrumento básico es el **pluviómetro**, que registra la lámina precipitada acumulada en **milímetros** (1 mm equivale a 1 litro por metro cuadrado de superficie). Para el registro continuo e intensidad instantánea se usa el **pluviógrafo**. Los datos de múltiples estaciones se interpolan sobre la cuenca mediante métodos como polígonos de Thiessen o interpolación por distancia inversa (IDW).

nn

Parámetros fundamentales

n

n

– **Intensidad (mm/h):** precipitación por unidad de tiempo. Determina el caudal de diseño de canales y alcantarillas.

n

– **Duración:** extensión temporal del evento.

n

– **Período de retorno (años):** inverso de la probabilidad de excedencia anual. Una lluvia de período de retorno de 10 años tiene 10% de probabilidad de ocurrir cualquier año. Es el parámetro central del diseño hidrológico.

n

nn

Fuentes

n

n

– Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1994). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

n

– Organización Meteorológica Mundial (2009). *Guía de Prácticas Hidrológicas, Vol. I*. OMM-No. 168. Ginebra.

n

- USGS Water Science School. Precipitation and the Water Cycle. U.S. Geological Survey.

n

CAPÍTULO 5

¿Qué es el fenómeno de la coalescencia?

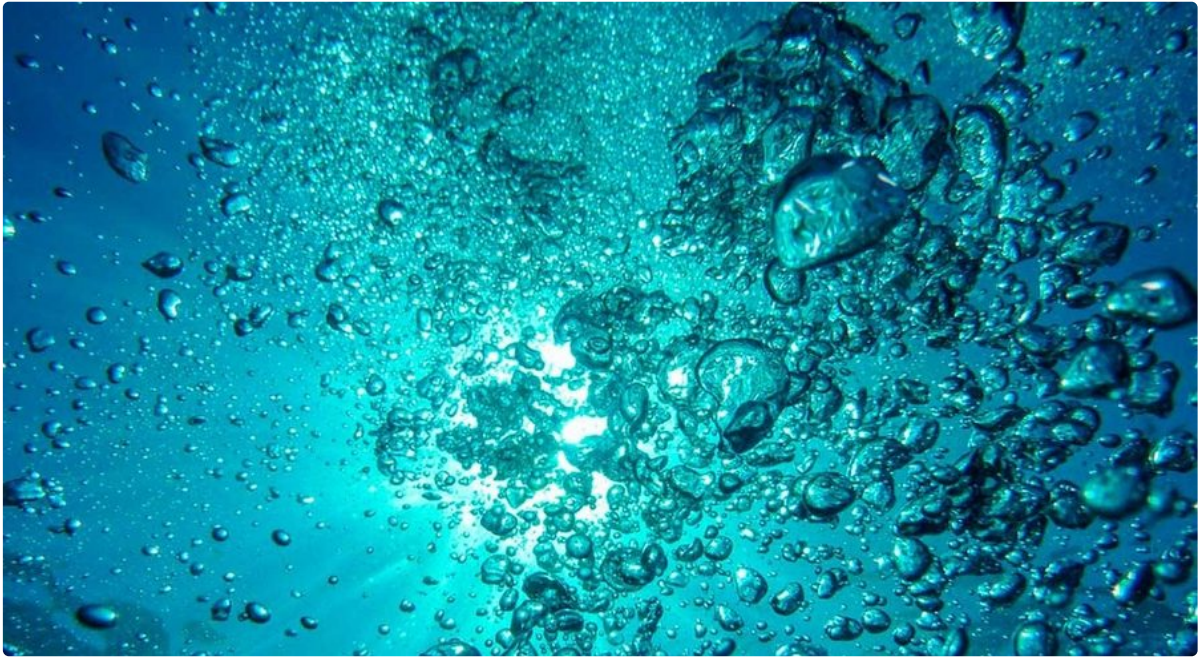


El fenómeno de la coalescencia, cómo se describe en la RAE, es la propiedad de las cosas de unir o fundirse. En cuanto al campo de la aireación para el tratamiento de agua, **este es el fenómeno que se crea cuando se unen las burbujas de aire mientras atraviesan el fluido del agua.**

¿Cuáles son las causantes de la coalescencia?

Para que se pueda producir el fenómeno de la coalescencia es necesario que éstas estén en contacto, y los siguientes factores afectan este contacto:

- Dimensiones de las burbujas: Las burbujas con un volumen grande facilitan el contacto entre ellas, dando como resultado este fenómeno.
- Separación entre difusores: Cuando se aumenta la distancia entre difusores se hace más complicada la capacidad que tienen las burbujas producidas por un difusor de impactar con las que son producidas por otro difusor.
- Altura de la lámina de agua: Conforme las burbujas suben tienen tendencia a formar una columna de aire siendo muy pequeña la separación entre estas, por lo que se facilita la coalescencia.



Ventajas de la coalescencia

- Aumenta el volumen de las burbujas.
- El fenómeno de la coalescencia se puede usar como una técnica de separación mediante el proceso de la coalescencia. Generalmente se usa en desarenadores y desgrasadores para la separación de arenas y aceites del agua.
- El aumento en el volumen de las burbujas favorece la agitación del fluido, produciendo condiciones idóneas para la homogenización.

Desventajas de la coalescencia

- Reducción de la superficie específica.
- Disminución de la transferencia de oxígeno.
- Reducción de tiempo de retención del oxígeno en el tanque.

Como evitar que se produzca este fenómeno en sistemas de difusores

- Usar difusores que permitan distribuir el aire mediante pequeñas burbujas con un diámetro no más grande de 2 mm.
- Aumentar la separación que hay entre los difusores.

- Disminuir los metros cúbicos de agua situados por encima del difusor.

El termino de coalescencia también se usa para explicar los fenómenos de soldadura en partículas de metales, esto durante la denominada soldadura por fusión, mediante la acción térmica, en dónde se puede conseguir la coalescencia de granos parcialmente fundidos que puedan formar un único sistema de cristales.

CAPÍTULO 6

¿Qué es la lluvia de diseño?

La lluvia de diseño es la precipitación hipotética adoptada para diseñar una obra hidráulica. Se obtiene combinando un período de retorno, una duración y las curvas IDF del lugar.

Definición

n

La **lluvia de diseño** (o tormenta de diseño) es la precipitación hipotética que se adopta como referencia para dimensionar una obra hidráulica, como un canal de drenaje, un alcantarillado o un embalse. Su objetivo es representar la peor tormenta que la obra debe soportar sin fallar, según el nivel de riesgo aceptado.

nn

Curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia)

n

Las curvas **IDF** son la herramienta fundamental para construir lluvias de diseño. Relacionan tres variables:

n

n

– **Intensidad (i):** precipitación por unidad de tiempo [mm/h].

n

– **Duración (D):** tiempo durante el cual cae la lluvia [min u horas].

n

– **Frecuencia (T):** período de retorno del evento [años].

n

n

La relación general tiene la forma: $i = K \cdot T^m / (D + t_0)^n$, donde K, m, t_0 y n son parámetros calibrados con datos históricos de la estación pluviográfica.

nn

Construcción de la lluvia de diseño

n

n

1. Seleccionar el **período de retorno** según la importancia de la obra (p. ej. T=25 años para drenaje urbano menor, T=100 para sistemas troncales).

n

2. Determinar la **duración** igual al tiempo de concentración de la cuenca.

n

3. Leer la **intensidad** en la curva IDF correspondiente.

n

4. Distribuir la lluvia en el tiempo según un hietograma de diseño (p. ej. bloques alternados, SCS Tipo II).

n

nn

Distribución temporal: hietograma

n

El **hietograma** describe cómo se distribuye la intensidad de la lluvia a lo largo de su duración. No toda la lluvia cae a intensidad constante: los métodos como el de *bloques alternados* (Chow) o la tormenta sintética SCS concentran la intensidad máxima hacia el centro del evento para representar el caso más desfavorable.

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Chow, V. T. et al. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Cap. 13.

n

- NRCS/SCS (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Technical Release 55 (TR-55). USDA.

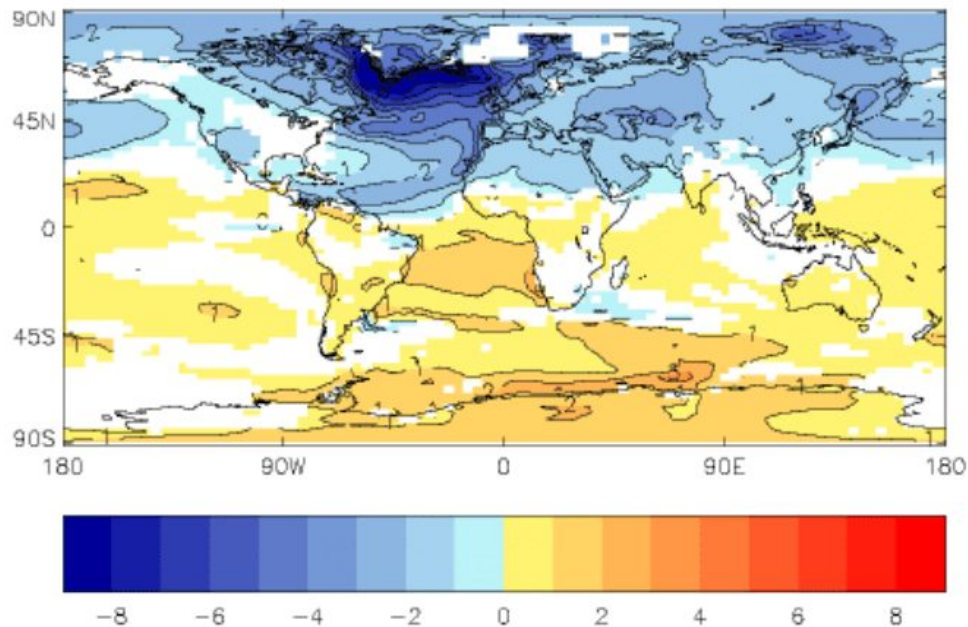
n

- Ministerio de Fomento de España (1999). *Máximas Lluvias Diarias en la España Peninsular*. Dirección General de Carreteras.

n

CAPÍTULO 7

Temperatura de la superficie del mar



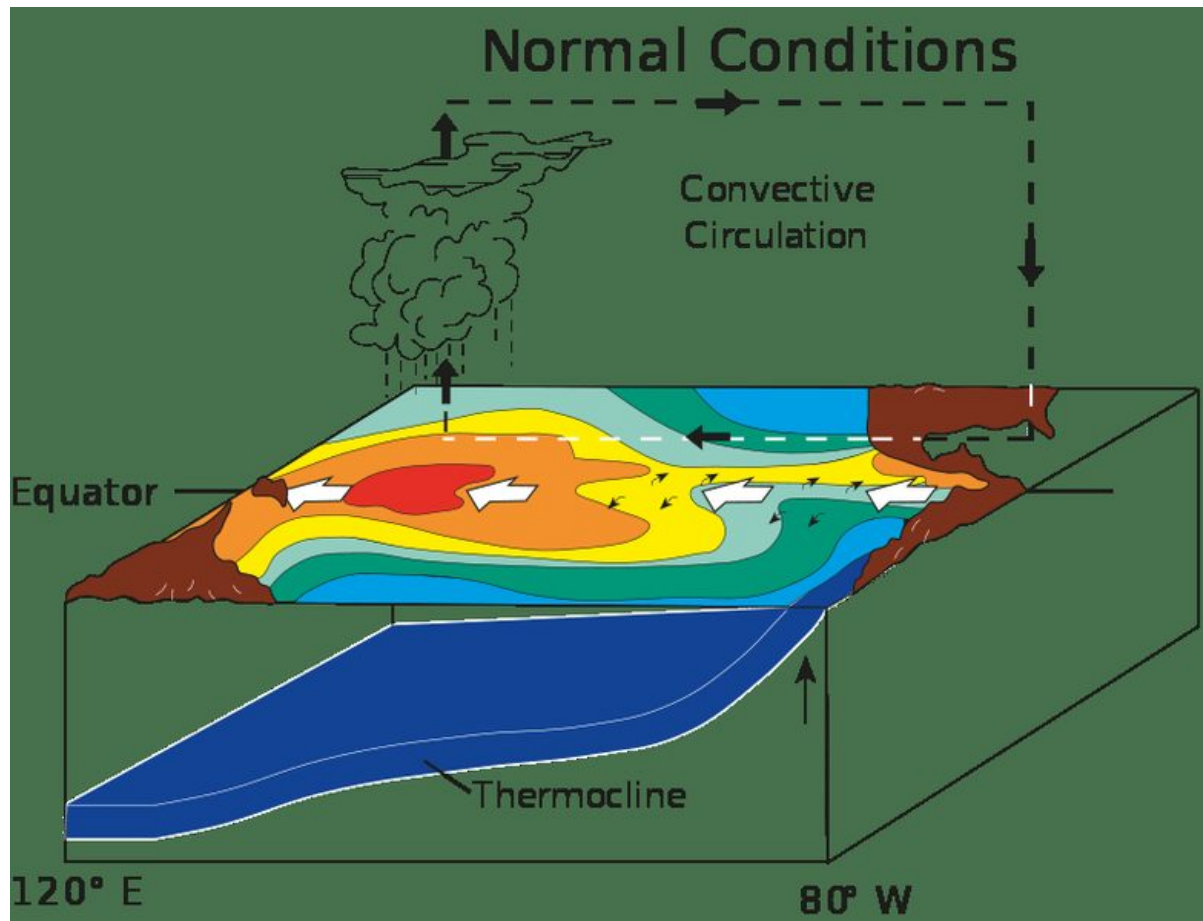
La temperatura de la superficie del mar (TSM o español o SST en inglés) es, como te podrás imaginar, la temperatura en la superficie del mar. Ahora considerando que el 71 por ciento de la superficie de la tierra está cubierta por agua, la tierra es, por decirlo así, un planeta oceánico, por lo que esta variable toma gran relevancia a la hora de realizar modelaciones e intentar comprender la influencia sobre ciertas cuencas o regiones que estemos estudiando.

Debido a su gran capacidad de calorífica, el océano actúa como la principal fuente de almacenamiento de calor y es principalmente calentado y enfriado desde su capa superior a inferior. Esto en contraste a la atmosfera, que es en gran medida calentada desde abajo hacia arriba a través del océano.

Debido a que el agua no es perfectamente transparente, la mayoría de la luz solar es absorbida en la capa superficial, mientras que el viento y la circulación de ondas mueven el agua en esta capa, distribuyéndola dentro de ella, haciendo que la temperatura, relativamente se uniformice en los primeros metros. Debajo de esta capa de mezcla, la temperatura baja muy rápidamente. Esa área de rápida transición es llamada **la termo-**

clina; debajo de ella, la temperatura continúa cayendo, pero mucho más gradualmente, este concepto es fundamental para entender el funcionamiento de la temperatura del mar.

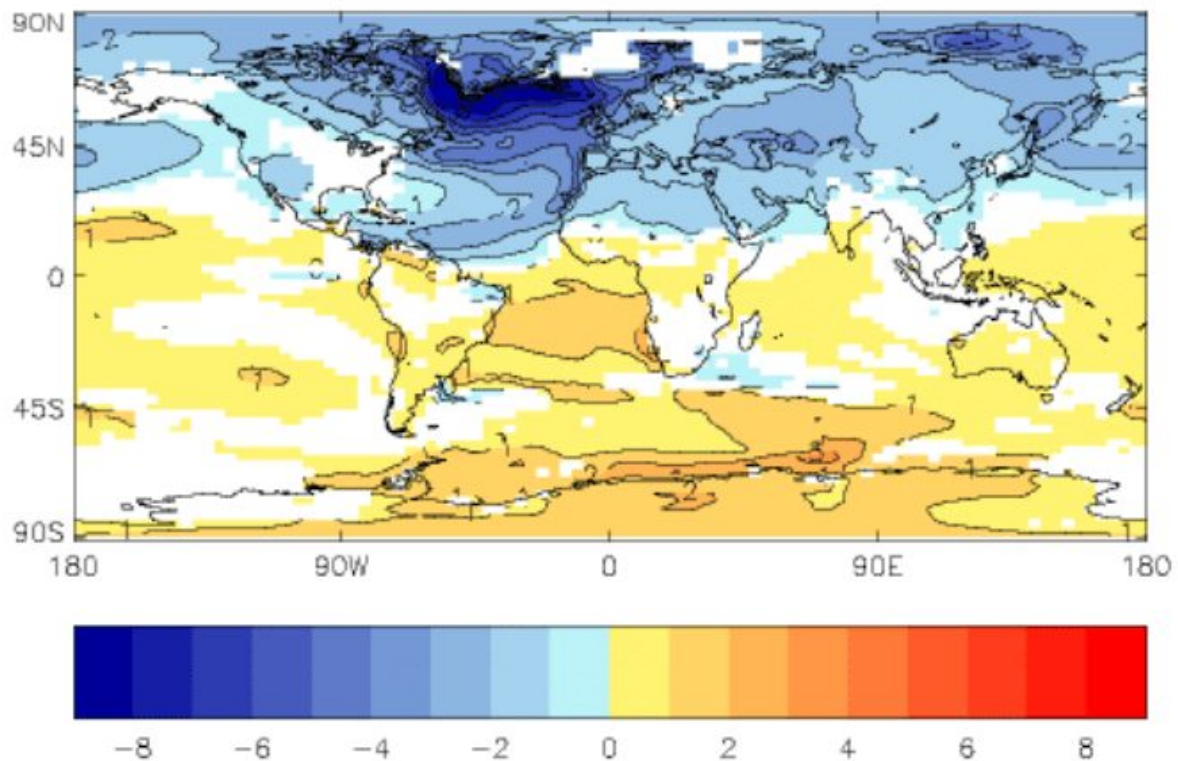
Ejemplo de esta estratificación:



La termoclina varía con la latitud y la estación: es permanente en los trópicos, variable en los climas templados (más fuerte en los veranos), y débil a inexistente en las regiones polares, donde la columna de agua está tan fría en la superficie como en el fondo.

Esto genera que la estructura termal del océano es fundamentalmente diferente a la de la atmosfera. En términos de temperatura, con excepción en aguas polares, una termoclina principal o permanente está presente todo el tiempo en el océano. En latitudes medias, la temperatura de la capa superior de la superficie del mar muestra variaciones estacionales asociadas con la acumulación de temperatura del verano y la liberación de calor del invierno. En resumen, en invierno la temperatura de la superficie es baja, mientras que en verano la temperatura superficial aumenta.

El promedio anual de la temperatura superficial del mar se puede ver en:



El rango en que la temperatura del mar varía, desde más de 29°C en algunas partes de los trópicos hasta aproximadamente 1.8°C.

La redistribución de la temperatura oceánica, en este ciclo de circulación termoclina, opera en escalas de décadas a siglos, en promedio, toma alrededor de 1600 años para completar un ciclo, por ejemplo, para el agua circular desde la superficie a lo más profundo del océano y volver a la superficie. Sin embargo, también hay evidencia de cambios rápidos en la circulación termoclina del noratlántico sobre periodos de cambios tan cortos como una década o dos, sugiriendo que la termoclina circulación puede ser un factor significativo en la variabilidad climática en escala decadal.

Fuentes:

Handbook of hydrology, David R. Maidment

https://www.researchgate.net/figure/Changement-de-la-SST-en-absence-de-circulation-thermohaline-31_fig5_282748840

https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_la_superficie_del_mar

<https://es.wikipedia.org/wiki/Termoclina>

PARTE III

Cuencas Hidrográficas

La cuenca hidrográfica es la unidad fundamental de análisis en hidrología. Su delimitación, morfometría y clasificación determinan cómo responde un territorio ante la lluvia.

CAPÍTULO 8

¿Qué es una cuenca hidrográfica?

La cuenca hidrográfica es la unidad básica de la hidrología. Aprende qué es, cómo se delimita y cuáles son sus parámetros morfométricos fundamentales.

Una **cuenca hidrográfica** (también llamada cuenca de drenaje o *watershed* en inglés) es el área geográfica desde la cual toda el agua de lluvia drena hacia un punto común de salida llamado **exutorio** o punto de aforo. Sus límites están definidos por las **líneas divisorias de aguas**, que siguen las cumbres y relieves más altos del terreno. La cuenca es la unidad fundamental de planificación y gestión de los recursos hídricos.

nn

Parámetros morfométricos básicos

n

Conocer la geometría de una cuenca permite estimar su respuesta hidrológica antes de tener datos de caudal:

n

n

– **Área (km²):** determina el volumen potencial de escorrentía. Una cuenca grande genera caudales mayores, pero con respuesta más lenta.

n

– **Coefficiente de compacidad (Gravelius):** relaciona el perímetro de la cuenca con el de un círculo de igual área. Un valor cercano a 1 indica cuenca redondeada (responde más rápido a la lluvia); valores mayores indican cuenca alargada.

n

– **Pendiente media del cauce principal:** influye en la velocidad del flujo y en el tiempo de concentración.

n

– **Tiempo de concentración (Tc):** tiempo que tarda el agua en viajar desde el punto más lejano de la cuenca hasta el exutorio. Define la *duración de diseño* en hidrología.

n

– **Orden de Strahler:** sistema para clasificar la jerarquía de los cauces de la red de drenaje.

n

nn

Clasificación

n

n

– **Por tamaño:** microcuenca (<25 km²), cuenca media (25–250 km²), gran cuenca (>250 km²).

n

– **Por conexión con el mar (exorreica, endorreica, arreica):** las cuencas endorreicas drenan hacia un lago o salar interior sin conexión al océano (ej.: cuenca del Altiplano).

n

– **Por régimen:** perenne (agua todo el año), intermitente, efímera (solo tras lluvias).

n

nn

Fuentes

n

n

– Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.

n

- Aparicio Mijares, F.J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa, México.

n

- FAO (2017). *Watershed Management in Action: Lessons learned from FAO field projects*. FAO Rome.

n

CAPÍTULO 9

¿Cuáles son los tipos de Cuencas Hidrográficas?

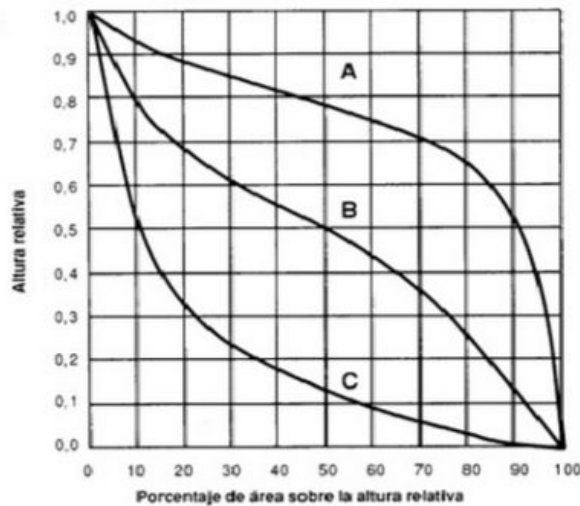


Quizá está a veces es una pregunta que no se llega a hacer mucho, sin embargo, es bastante importante conocerla al momento que se empieza a conocer una cuenca. Para comenzar llamamos cuenca hidrográfica a la superficie que es delimitada por línea de cumbres, también llamada divisoria de aguas. Entonces, bajo este punto de vista de evacuación de las aguas, tenemos varios tipos de cuencas: **Cuencas Exorreicas:** Son las cuencas que están formadas por ríos que vierten su agua en el océano. **Cuenca Endorreica:** Formada por los ríos que desaguan en mares interiores, lagos o lagunas, son cuencas cerradas que retienen el agua y no permiten salidas a otros cuerpos de aguas, como ríos u océanos, pero convergen en lagos o mares interiores, pueden ser permanentes o temporales, que llegan a su equilibrio mediante evaporación. **Cuenca Arreica:** No es una cuenca en su sentido hidrológico, sino una región continental interior, sin salida al mar y sin una red de drenaje definida. Es decir que corresponden a cuencas que generalmente carecen de cursos de agua o en las que es muy difícil determinar la divisoria de agua

debido a su lento escurrimiento. Son cuencas cuyas aguas no desembocan ni en lagos ni en mares, pues se evaporan o se infiltran al suelo, desapareciendo del paisaje. **Cuenca Criptorreica:** Es una region continental de drenaje subterráneo carente de una red de drenaje definida, es decir donde de repente desaparecen las corrientes. **Fuente:** <https://sciencing.com/info-8431341-types-drainage-basins.html> <https://sites.google.com/site/hidrografiaargen/tipos-de-cuencas> <https://sites.google.com/site/geopiredamara/hidrografia-ar>

CAPÍTULO 10

¿Qué es una curva hipsométrica?



Curva A: refleja una cuenca con gran potencial erosivo (fase de juventud).

Curva B: es una cuenca en equilibrio (fase de madurez).

Curva C: es una cuenca sedimentaria (fase de vejez).

→ *Recurso complementario disponible en ingeciv.com*

PARTE IV

Agua en el Suelo

Entre la lluvia que cae y el río que fluye existe una zona crucial: el suelo. La infiltración, la humedad, la permeabilidad y la evapotranspiración determinan cuánta agua queda disponible y cuánta alimenta los acuíferos.

CAPÍTULO 11

¿Qué es la infiltración?

La infiltración es el proceso por el que el agua penetra en el suelo. Determina cuánta lluvia se convierte en escorrentía y cuánta recarga los acuíferos. Conoce sus modelos y factores.

La **infiltración** es el proceso mediante el cual el agua de la superficie penetra en el suelo, moviéndose por gravedad y fuerzas capilares a través de sus poros y fracturas. Es uno de los procesos clave del ciclo hidrológico: determina qué fracción de la lluvia se convierte en escorrentía (con todo lo que eso implica para crecidas e inundaciones) y qué fracción recarga los acuíferos subterráneos.

nn

Factores que controlan la infiltración

n

n

- **Textura del suelo:** los suelos arenosos (poros grandes) tienen alta infiltración; los arcillosos, muy baja. Ejemplo: una arena limpia puede infiltrar más de 25 mm/h; una arcilla compacta, menos de 1 mm/h.

n

- **Estructura y macroporos:** grietas, galerías de lombrices, canales de raíces y agregados del suelo aumentan significativamente la infiltración real.

n

- **Cobertura vegetal:** la vegetación protege la superficie del sellado por impacto de gotas (costra superficial), mantiene la estructura del suelo y favorece la actividad biológica.

n

- **Contenido inicial de humedad:** un suelo seco infiltra más rápido al inicio (gradiente capilar alto); un suelo ya saturado no puede infiltrar más.

n

- **Compactación:** el tráfico de maquinaria, el pisoteo intenso o la lluvia misma puede sellar la superficie y reducir drásticamente la infiltración.

n

nn

Modelos de infiltración

n

n

- **Modelo de Horton (1940):** la tasa de infiltración decrece exponencialmente desde un máximo f_o hasta una tasa constante f_o : $f(t) = f_o + (f_o - f_o) \cdot e^{(-kt)}$. Es empírico, sencillo y ampliamente usado.

n

- **Modelo de Green-Ampt (1911):** enfoque físico basado en el avance del frente de humectación. Más preciso y ampliamente implementado en software como HEC-HMS.

n

- **Índice ϕ (phi):** método simplificado que asume una tasa de infiltración constante, ajustada para reproducir el volumen de escorrentía observado. Útil para análisis rápidos.

n

nn

Fuentes

n

n

- Horton, R.E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5, 399–417.

n

- Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911). Studies on soil physics: Part I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24.

n

- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. & Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), 62–70.

n

CAPÍTULO 12

¿Qué es la humedad del suelo?

La humedad del suelo es la cantidad de agua almacenada en los poros del suelo, entre la superficie y la zona saturada. Controla la escorrentía, la infiltración, el crecimiento vegetal y el pronóstico de crecidas.

Definición

n

La **humedad del suelo** (o contenido de agua en el suelo) es la cantidad de agua almacenada en la zona no saturada del suelo, es decir, entre la superficie y el nivel freático. Se expresa habitualmente como:

n

n

– **Contenido volumétrico (θ):** volumen de agua / volumen total de suelo [m^3/m^3 o %].

n

– **Contenido gravimétrico (w):** masa de agua / masa de suelo seco [g/g o %].

n

nn

Estados de humedad relevantes

n

n

– **Capacidad de campo (CC):** contenido de agua retenido después de que el drenaje gravitacional ha cesado (~24-48 h después de lluvia intensa). Es el límite superior de agua disponible para las plantas.

n

– **Punto de marchitez permanente (PMP):** contenido mínimo de agua por debajo del cual las plantas no pueden extraer agua y se marchitan irreversiblemente.

n

– **Agua disponible (AD):** $AD = CC - PMP$ — la fracción útil para los cultivos.

n

– **Saturación:** todos los poros llenos de agua; ocurre durante e inmediatamente después de lluvia intensa.

n

nn

Importancia hidrológica

n

n

– **Control de la escorrentía:** un suelo ya saturado generará escorrentía casi inmediata ante cualquier lluvia, aumentando el caudal pico.

n

– **Pronóstico de crecidas:** la humedad antecedente del suelo (condición AMC en el método CN del SCS) es el factor que más influye en la respuesta hidrológica de una cuenca.

n

– **Riego:** el monitoreo de la humedad del suelo permite regar sólo cuando es necesario, optimizando el uso del agua.

n

– **Recarga de acuíferos:** cuando la humedad supera la capacidad de campo, el exceso percola hacia la zona saturada.

n

nn

Medición

n

Los métodos más usados son: **sonda TDR** (Time Domain Reflectometry), **tensiómetros**, **sondas FDR** (capacitancia), **sensores de rayos cósmicos** (miden área extensa) y datos satelitales (SMAP, Sentinel-1).

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press.

n

- Jury, W. A. & Horton, R. (2004). *Soil Physics*. 6th ed. Wiley.

n

- Dorigo, W. et al. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding. *Remote Sensing of Environment*, 203, 185–215.

n

CAPÍTULO 13

¿Qué es la permeabilidad del suelo?

La permeabilidad es la capacidad de un suelo o roca para permitir el paso de fluidos a través de sus poros. Es fundamental para entender el movimiento del agua subterránea, la infiltración y el drenaje.

Definición

n

La **permeabilidad** (o conductividad hidráulica, K) es una propiedad que describe la facilidad con que un fluido puede fluir a través de un medio poroso como el suelo o la roca. En hidrología e hidráulica subterránea, la permeabilidad determina la velocidad a la que el agua se mueve a través del subsuelo.

n

La Ley de Darcy relaciona el caudal Q con la permeabilidad:

n

$$Q = K \cdot i \cdot A$$

n

donde K es la conductividad hidráulica [m/s], i el gradiente hidráulico (diferencia de nivel / distancia) y A el área transversal.

nn

Valores típicos de K

n

n

– **Grava limpia:** $10^{-2} - 10^0$ m/s (muy permeable)

n

– **Arena gruesa:** $10^{-4} - 10^{-2}$ m/s

n

– **Arena fina / limo:** $10^{-6} - 10^{-4}$ m/s

n

– **Arcilla:** $10^{-10} - 10^{-8}$ m/s (prácticamente impermeable)

n

nn

Factores que influyen

n

n

– **Tamaño y distribución de poros:** suelos con partículas grandes tienen poros más grandes y mayor permeabilidad.

n

– **Porosidad:** mayor porosidad generalmente implica mayor permeabilidad.

n

– **Viscosidad del fluido:** el agua fría es más viscosa y fluye más lentamente que el agua caliente.

n

– **Presencia de arcillas:** las arcillas cierran los poros y reducen la permeabilidad drásticamente.

n

nn

Medición en laboratorio

n

Se mide en laboratorio con un **permeámetro de carga constante** (para suelos permeables) o de **carga variable** (para suelos poco permeables). En campo se realizan ensayos de bombeo o infiltrómetros.

nn

Importancia práctica

n

La permeabilidad es clave en el diseño de sistemas de drenaje agrícola, la estimación de la infiltración en modelos hidrológicos, el análisis de estabilidad de taludes y el diseño de rellenos sanitarios (para evitar la contaminación de acuíferos).

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont, Paris.

n

- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier.

n

- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.

n

CAPÍTULO 14

¿Qué es la evapotranspiración?

La evapotranspiración: clave en el ciclo hidrológico.



La evapotranspiración es un proceso esencial en el ciclo hidrológico que combina la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas. Este fenómeno juega un papel crucial en la regulación del agua en los ecosistemas y en la atmósfera, afectando tanto al clima como a la disponibilidad de recursos hídricos. En este artículo, exploraremos en detalle la definición y los conceptos fundamentales de la evapotranspiración, así como los factores que influyen en su variabilidad dentro de diferentes ecosistemas.

Definición y Conceptos Fundamentales de la Evapotranspiración

La evapotranspiración se define como la suma de la evaporación del agua desde la superficie del suelo y la transpiración del agua a través de las plantas. La evaporación es el proceso mediante el cual el agua pasa de estado líquido a vapor y se transfiere a la atmósfera. Por otro lado, la transpiración es el proceso mediante el cual las plantas absorben agua del suelo a través de sus raíces y la liberan en forma de vapor de agua a través de pequeños poros en sus hojas llamados estomas. El concepto de evapotranspiración es fundamental en la hidrología y en la gestión de recursos hídricos, ya que representa una de las principales vías de pérdida de agua desde los ecosistemas terrestres hacia la atmósfera. La tasa de evapotranspiración se mide comúnmente en milímetros por día (mm/día) y puede variar significativamente dependiendo de diversos factores ambientales y biológicos. Existen métodos diversos para estimar la evapotranspiración, que van desde técnicas directas como el uso de lisímetros, hasta métodos indirectos como las fórmulas empíricas y modelos de simulación. Técnicas modernas como el uso de sensores remotos y estaciones meteorológicas avanzadas han mejorado considerablemente la precisión en la estimación de este proceso, permitiendo una mejor gestión y planificación del uso del agua en agricultura y conservación ambiental.

Factores que Afectan la Evapotranspiración en Ecosistemas



La evapotranspiración está influenciada por una variedad de factores climáticos, biológicos y edáficos. Entre los factores climáticos más importantes se encuentran la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. La radiación solar proporciona la energía necesaria para la evaporación, mientras que la temperatura del aire influye en la capacidad de la atmósfera para retener vapor de agua. La humedad relativa afecta la gradiente de concentración de vapor entre la superficie y la atmósfera, y la velocidad del viento facilita la dispersión del vapor de agua. En términos biológicos, el tipo de vegetación y las características fisiológicas de las plantas juegan un papel crucial en la transpiración. Las plantas con hojas grandes y numerosas

estomas tienden a tener tasas de transpiración más altas. Además, las estrategias adaptativas de las plantas, como la apertura y cierre de estomas en respuesta a condiciones ambientales, también afectan significativamente la evapotranspiración. Los factores edáficos, como la textura y estructura del suelo, la capacidad de retención de agua y la presencia de materia orgánica, influyen directamente en la disponibilidad de agua para las plantas y, por ende, en la cantidad de agua que puede ser evaporada y transpirada. Suelos arenosos con baja capacidad de retención de agua tienden a tener tasas de evapotranspiración más bajas en comparación con suelos arcillosos o ricos en materia orgánica que pueden retener más agua y liberar gradualmente. La comprensión de la evapotranspiración y los factores que la afectan es crucial para gestionar los recursos hídricos de manera eficiente y sostenible. Este conocimiento es vital para la agricultura, la planificación urbana, la conservación ambiental y la predicción de cambios climáticos. El continuo avance en las técnicas de medición y modelación de la evapotranspiración permitirá desarrollar estrategias más efectivas para enfrentar los desafíos asociados con la disponibilidad y el uso del agua en un mundo cambiante.

CAPÍTULO 15

¿Qué es el balance hídrico?

El balance hídrico es la ecuación fundamental de la hidrología: relaciona la precipitación con la escorrentía, la evapotranspiración, la infiltración y el cambio en el almacenamiento de agua en una cuenca.

Definición

n

El **balance hídrico** (o balance de agua) es la aplicación del principio de conservación de la masa al ciclo del agua en una cuenca hidrográfica. Establece que toda el agua que entra a un sistema debe salir o quedar almacenada en él. Su ecuación fundamental es:

n

$$P = ET + Q + \Delta S$$

n

n

– **P**: Precipitación (entrada)

n

– **ET**: Evapotranspiración (salida por evaporación y transpiración de plantas)

n

– **Q**: Escorrentía o caudal de salida de la cuenca

n

– **ΔS** : Cambio en el almacenamiento (agua subterránea, lagos, nieve)

n

nn

Escala temporal y espacial

n

El balance hídrico puede aplicarse a distintas escalas:

n

n

- **Anual:** a largo plazo, $\Delta S \approx 0$ y la ecuación se simplifica a $P = ET + Q$.

n

- **Mensual o estacional:** ΔS cobra importancia, especialmente en cuencas con nieve o acuíferos significativos.

n

- **Cuenca:** balance en toda el área de drenaje.

n

- **Parcela o campo agrícola:** para gestión del riego.

n

nn

Aplicaciones

n

n

- **Planificación de recursos hídricos:** determina cuánta agua está disponible para uso humano, agrícola e industrial.

n

- **Diseño de embalses:** el volumen de almacenamiento necesario se basa en el balance hídrico interanual.

n

- **Evaluación del cambio climático:** proyectar cómo variará P y ET modifica el balance y la disponibilidad futura de agua.

n

- **Manejo de cuencas degradadas:** comparar el balance antes y después de la deforestación o reforestación.

n

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R. (1955). The water balance. *Publications in Climatology*, 8(1), Drexel Institute of Technology.

n

- Chow, V. T. et al. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Cap. 3.

n

- UNESCO & WMO (2012). *International Glossary of Hydrology*. 3rd edition.

n

PARTE V

Escorrentía, Caudal e Hidráulica

La escorrentía es el agua que no se infiltra ni se evapora y fluye por la superficie hacia los cauces. Su cuantificación — desde el número de curva hasta el hidrograma — es el núcleo del diseño hidrológico.

CAPÍTULO 16

¿Qué es la escorrentía superficial?

La escorrentía superficial es la fracción de la lluvia que fluye sobre el terreno sin infiltrarse. Conoce sus factores y los métodos de cálculo más usados en hidrología.

La escorrentía superficial es la fracción de la precipitación que fluye sobre la superficie del terreno sin infiltrarse y que eventualmente alcanza ríos, lagos o el mar. Junto con la infiltración y la evapotranspiración, constituye el balance hídrico de cualquier cuenca.

nn

¿Por qué no toda la lluvia se infiltra?

n

Cuando la intensidad de la lluvia supera la **capacidad de infiltración del suelo**, el excedente comienza a desplazarse pendiente abajo: esto se denomina **mecanismo de Horton** (escorrentía por exceso de infiltración). Un segundo mecanismo, descrito por Dunne, ocurre cuando el suelo ya está saturado: toda la lluvia adicional se transforma en escorrentía, incluso a baja intensidad.

nn

Factores que la determinan

n

n

- **Permeabilidad del suelo:** suelos arenosos producen poca escorrentía; suelos arcillosos o compactados, mucha.

n

- **Cobertura vegetal:** la vegetación intercepta la lluvia, aumenta la infiltración y reduce la velocidad del flujo superficial.

n

- **Pendiente del terreno:** a mayor pendiente, mayor velocidad y menor tiempo de infiltración.

n

- **Humedad antecedente:** un suelo ya húmedo antes del evento genera más escorrentía.

n

- **Urbanización:** las superficies impermeables (asfalto, hormigón) eliminan la infiltración y aumentan drásticamente la escorrentía.

n

nn

Métodos de estimación

n

n

- **Método Racional:** $Q = C \cdot i \cdot A$, donde C es el coeficiente de escorrentía (0–1), i la intensidad de diseño (mm/h) y A el área de la cuenca (ha). Simple y ampliamente usado para cuencas pequeñas (<200 ha).

n

- **Curva Número CN (NRCS/SCS):** método empírico que clasifica el suelo según textura, uso de suelo y condición de humedad para estimar el volumen de escorrentía directa. Muy usado en diseño de obras de retención y análisis de crecidas.

n

nn

Fuentes

n

n

- Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1994). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

n

- USDA-NRCS (2004). *National Engineering Handbook, Part 630 – Hydrology*. United States Department of Agriculture.

n

- Horton, R.E. (1933). The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, 14, 446–460.

n

CAPÍTULO 17

¿Qué es el número de curva (CN)?

El número de curva (CN) es un parámetro del método SCS/NRCS que resume en un solo valor la capacidad de una cuenca para generar escorrentía. Es la herramienta más usada en el mundo para estimar el volumen de escorrentía directa a partir de la lluvia.

Definición

n

El **número de curva** (CN, del inglés *Curve Number*) es un parámetro adimensional desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. (SCS, hoy NRCS) que sintetiza en un valor entre 0 y 100 la respuesta hidrológica de una cuenca ante la lluvia, en función de:

n

n

- El **tipo de suelo** (grupos hidrológicos A, B, C, D según su permeabilidad).

n

- El **uso y cobertura del suelo** (bosque, pradera, cultivo, área urbana, etc.).

n

- La **condición de humedad antecedente** (AMC I, II o III según la lluvia de los 5 días previos).

n

nn

Grupos hidrológicos de suelo

n

n

- **Grupo A:** arena, grava; alta infiltración → CN bajo → poca escorrentía.

n

- **Grupo B:** franco arenoso; infiltración moderada.

n

- **Grupo C:** franco arcilloso; infiltración lenta.

n

- **Grupo D:** arcilla; muy baja infiltración → CN alto → mucha escorrentía.

n

nn

Valores típicos de CN

n

n

- Bosque en buen estado (suelo A): CN ≈ 30

n

- Pradera (suelo B): CN ≈ 61

n

- Cultivo en hileras (suelo C): CN ≈ 74

n

- Zona residencial, lotes grandes (suelo B): CN ≈ 61

n

- Zona comercial / industrial (suelo D): CN ≈ 95

n

- Pavimento impermeable: CN = 98

n

nn

Cálculo de la escorrentía directa

n

Una vez conocido el CN, la escorrentía directa (Q) ante una precipitación (P) se estima con:

n

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S)$$

n

donde S es la abstracción potencial máxima: $S = (25400/CN) - 254$ [mm], e $I_a = 0.2 \cdot S$ es la abstracción inicial (intercepción, llenado de depresiones e infiltración inicial).

nn

Para qué se usa

n

El método CN es la base del hidrograma de diseño SCS y del software HEC-HMS, HEC-RAS y TR-55. Permite evaluar rápidamente el impacto del cambio de uso de suelo (p. ej. urbanización) sobre el volumen de escorrentía y el caudal pico de una cuenca.

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

– USDA-NRCS (2004). *National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes*.

n

– Chow, V. T. et al. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Cap. 5.

n

– Ponce, V. M. & Hawkins, R. H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19.

n

CAPÍTULO 18

¿Qué es el tiempo de concentración?

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda en llegar a la salida de una cuenca la gota de lluvia que cae en el punto más alejado. Es el parámetro clave para estimar el caudal pico de diseño.

Definición

n

El **tiempo de concentración** (T_c) es el tiempo que transcurre desde que comienza la lluvia hasta que toda la cuenca hidrográfica está contribuyendo simultáneamente al caudal en su punto de salida (sección de control o exutorio). En términos prácticos, corresponde al tiempo de viaje de la gota de lluvia que cae en el punto más lejano de la cuenca hasta la salida.

nn

¿Por qué es importante?

n

El T_c determina la duración de lluvia que genera el caudal máximo en una cuenca. Si la duración de la tormenta iguala o supera el T_c , toda la cuenca drena simultáneamente y se alcanza el **caudal pico**. Este concepto es la base del *método racional*:

n

$$Q = C \cdot i \cdot A / 360$$

n

donde i es la intensidad de lluvia [mm/h] para una duración igual al T_c y un período de retorno de diseño.

nn

Factores que lo controlan

n

n

- **Longitud del cauce principal:** cuencas más largas tienen mayor T_c .

n

- **Pendiente:** mayor pendiente → flujo más rápido → menor T_c .

n

- **Cobertura vegetal y rugosidad:** vegetación densa frena el flujo y aumenta el T_c .

n

- **Tipo de suelo y uso del suelo:** suelos impermeables o urbanizados reducen el T_c drásticamente.

n

nn

Fórmulas empíricas comunes

n

n

- **Kirpich (1940):** $T_c = 0.0195 \cdot L^{0.77} \cdot S^{(-0.385)}$ — para cuencas rurales pequeñas.

n

- **Témez (1978):** ampliamente usada en España e Iberoamérica para cuencas naturales.

n

- **SCS/NRCS:** método de la Curva Número, integrado en el hidrograma unitario sintético.

n

nn

Impacto de la urbanización

n

La impermeabilización del suelo en ciudades puede reducir el T_c de horas a minutos, multiplicando el caudal pico e incrementando el riesgo de inundaciones urbanas. Por eso el T_c es un parámetro central en el diseño de sistemas de drenaje urbano.

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.

n

- Témez, J. R. (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales*. MOPU, Madrid.

n

- Chow, V. T. et al. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Cap. 7.

n

CAPÍTULO 19

¿Qué es el caudal?

El caudal es el volumen de agua que pasa por una sección por unidad de tiempo. Es el parámetro central de la hidráulica aplicada. Aprende sus unidades y cómo se mide.

El **caudal** (o gasto) es el volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de un río, canal o conducto por unidad de tiempo. Es el parámetro más fundamental de la hidráulica aplicada: sin él no es posible diseñar acueductos, canales, alcantarillados, presas ni sistemas de riego.

nn

Unidades

n

La unidad del Sistema Internacional es el **metro cúbico por segundo (m^3/s)**. En la práctica también se usan:

n

n

- **L/s** (litros por segundo): $1 \text{ m}^3/\text{s} = 1\,000 \text{ L/s}$. Frecuente en caudales pequeños y abastecimiento.

n

- **m^3/h o $\text{m}^3/\text{día}$** : usado en sistemas de distribución de agua potable.

n

- **cfs** (pie cúbico por segundo): estándar en Estados Unidos. $1 \text{ cfs} \approx 0,028 \text{ m}^3/\text{s}$.

n

nn

Métodos de medición (aforo)

n

n

– **Molinete o correntómetro:** mide la velocidad en varios puntos de la sección transversal. El caudal se calcula como $Q = V \cdot A$ (método de las verticales o el método de área-velocidad).

n

– **Estructuras de control (vertederos, aforadores Parshall):** se utiliza la relación carga-caudal característica de la estructura. Simple y preciso para caudales pequeños.

n

– **Método de dilución:** se inyecta un trazador (sal, rodamina) y se mide su concentración aguas abajo. Útil en cauces turbulentos e inaccesibles.

n

– **Estación fluviométrica:** un sensor mide el nivel del agua continuamente; el caudal se obtiene mediante la **curva de gasto** (relación nivel-caudal calibrada para esa sección).

n

nn

El hidrograma

n

La variación del caudal en el tiempo se representa mediante el **hidrograma**, gráfico que muestra cómo responde un río a un evento de lluvia: tiempo al pico, caudal máximo, caudal base y tiempo de recesión. Analizar hidrogramas es esencial para diseñar obras de control de crecidas y sistemas de alerta temprana.

nn

Fuentes

n

n

- ISO 748:2007. *Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*. International Organization for Standardization.

n

- Organización Meteorológica Mundial (2010). *Guía de Prácticas Hidrológicas, Vol. I*. OMM-No. 168. Ginebra.

n

- Sotelo Ávila, G. (1977). *Hidráulica General, Vol. 1: Fundamentos*. Limusa, México.

n

CAPÍTULO 20

¿Qué es el aforo de caudales?

El aforo es la medición del caudal en un curso de agua. Es la operación fundamental de la hidrología aplicada: sin datos de caudal no es posible diseñar obras hidráulicas ni gestionar recursos hídricos.

Definición

n

El **aforo** (o medición de caudal) es el proceso de determinar el volumen de agua que pasa por una sección transversal de un curso hídrico por unidad de tiempo [m^3/s]. Es la operación de campo más importante de la hidrología, ya que los datos históricos de caudal son la base del análisis estadístico de frecuencias y del diseño de obras hidráulicas.

nn

Método velocidad-área

n

El método más usado en ríos naturales. Se basa en que $Q = \bar{V} \cdot A$, donde $\bar{V}$ es la velocidad media y A el área de la sección transversal. Los pasos son:

n

n

1. Dividir la sección transversal en *franjas verticales* (subáreas).

n

2. Medir la **profundidad** (tirante) en cada franja con una varilla de vadeo.

n

3. Medir la **velocidad** a 0.6 de la profundidad (un punto) o promedio 0.2+0.8 (dos puntos) con un correntómetro o sensor acústico.

n

4. Calcular el caudal de cada subárea: $q = v \cdot a$.

n

5. Sumar todas las subáreas: $Q = \sum q_i$.

n

nn

Instrumentos de medición

n

n

– **Correntómetro de hélice (molinete)**: el instrumento clásico; la velocidad de rotación de la hélice es proporcional a la velocidad del agua.

n

– **ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)**: mide el perfil completo de velocidades con ultrasonido; permite aforar desde una embarcación o sistema de teleférico en ríos grandes.

n

– **Flotadores**: método simple para caudales aproximados en emergencias; velocidad superficial $\times$ coeficiente de corrección.

n

nn

Curva de gasto (rating curve)

n

Aforar un río en todas las crecidas es impracticable. Por eso se establece la **curva de gasto**, que relaciona el *nivel (tirante) del río* con el *caudal*. Una vez calibrada, basta con registrar el nivel de forma continua (con un limnógrafo o sensor de presión) para obtener el caudal correspondiente. Esta es la base de las estaciones hidrológicas de monitoreo.

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- ISO 748:2007. *Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*. ISO.

n

- WMO (2010). *Manual on Stream Gauging. Vol. I: Fieldwork*. WMO-No. 1044.

n

- Herschy, R. W. (2009). *Streamflow Measurement*. 3rd ed. Taylor & Francis.

n

CAPÍTULO 21

¿Qué es un hidrograma?

Un hidrograma es la representación gráfica de cómo varía el caudal de un río o canal a lo largo del tiempo, especialmente en respuesta a una lluvia.

Definición

n

Un **hidrograma** es una gráfica que muestra la variación del caudal (o el nivel de agua) en una sección de un curso hídrico a lo largo del tiempo. Es una de las herramientas fundamentales en hidrología, ya que permite visualizar cómo responde una cuenca ante un evento de lluvia.

nn

Partes de un hidrograma

n

n

– **Tiempo de ascenso:** período desde el inicio de la esorrentía hasta el caudal máximo.

n

– **Caudal pico (Q_p):** el valor máximo de caudal registrado durante el evento.

n

– **Tiempo al pico:** tiempo transcurrido desde el inicio de la lluvia hasta el caudal máximo.

n

– **Curva de recesión:** descenso progresivo del caudal una vez pasado el pico.

n

- **Caudal base:** flujo sostenido proveniente del agua subterránea, presente antes y después del evento.

n

nn

Tipos de hidrograma

n

n

- **Hidrograma unitario:** respuesta de una cuenca ante una precipitación unitaria (1 mm o 1 cm en 1 hora). Es la base del método racional y del hidrograma unitario sintético.

n

- **Hidrograma de crecida:** respuesta ante una tormenta real, con su forma característica de ascenso y descenso.

n

nn

¿Para qué se usa?

n

Los hidrogramas son esenciales en el diseño de obras hidráulicas: permiten estimar el caudal máximo de diseño de puentes, alcantarillas y canales, así como el volumen de agua que puede acumular un embalse durante una tormenta. También se utilizan para calibrar modelos hidrológicos.

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

n

- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from rainfall by unit-graph method. *Engineering News Record*, 108, 501–505.

n

- Organización Meteorológica Mundial – WMO (2009). *Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*. WMO-No. 1045.

n

CAPÍTULO 22

¿Qué es la ecuación de Manning?

La ecuación de Manning es la fórmula más usada en ingeniería hidráulica para calcular la velocidad y el caudal en canales abiertos y ríos, en función de la pendiente, la sección y la rugosidad del cauce.

Definición

n

La **ecuación de Manning** (o fórmula de Manning-Strickler) es la expresión empírica más utilizada en hidráulica de canales abiertos para estimar la velocidad media del flujo. Fue propuesta por el ingeniero irlandés Robert Manning en 1889 y tiene la forma:

n

$$V = (1/n) \cdot R^{(2/3)} \cdot S^{(1/2)}$$

n

y el caudal:

n

$$Q = (1/n) \cdot A \cdot R^{(2/3)} \cdot S^{(1/2)}$$

n

donde:

n

n

– **V**: velocidad media [m/s]

n

– **n**: coeficiente de rugosidad de Manning [adimensional]

n

– **R**: radio hidráulico = A/P [m] (área / perímetro mojado)

n

- **S:** pendiente de la línea de energía [m/m] (en flujo uniforme $\approx$ pendiente del fondo)

n

- **A:** área de la sección transversal [m²]

n

nn

Coeficiente de rugosidad n

n

El valor de n depende del tipo de superficie del cauce. Valores típicos:

n

n

- Canal de hormigón liso: $n = 0.012\text{--}0.014$

n

- Canal de tierra limpio: $n = 0.022\text{--}0.026$

n

- Río natural, lecho de grava: $n = 0.025\text{--}0.035$

n

- Río natural con vegetación densa: $n = 0.040\text{--}0.150$

n

- Llanura de inundación con bosque: $n = 0.080\text{--}0.200$

n

n

La selección de n adecuado requiere experiencia y, cuando es posible, calibración con aforos.

nn

Radio hidráulico R

n

El **radio hidráulico** mide la eficiencia de la sección transversal: cuanto mayor es R (más área por menos perímetro mojado), menor es la fricción relativa y mayor la velocidad. El canal semicircular es el que maximiza R para un área dada.

nn

Condición de flujo uniforme

n

Manning es exacta para **flujo uniforme permanente** (velocidad constante en el espacio y en el tiempo). Para flujo variado (aceleraciones o desaceleraciones) se requieren métodos más complejos como las ecuaciones de Saint-Venant, utilizadas en modelos como HEC-RAS.

nn

Aplicaciones típicas

n

n

- Diseño de secciones de canales de riego y drenaje.

n

- Cálculo de la capacidad máxima de un cauce natural ante una crecida.

n

- Modelación hidráulica 1D de ríos (perfil de la línea de agua).

n

- Estimación de la velocidad de flujo en alcantarillas y colectores.

n

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Manning, R. (1891). On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 20, 161–207.

n

- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.

n

- French, R. H. (1985). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.

n

PARTE VI

Eventos Extremos e Inundaciones

Los eventos extremos — crecidas, inundaciones, tormentas centenales — son el problema hidrológico de mayor impacto social. Su análisis estadístico mediante el período de retorno es indispensable para el diseño seguro de infraestructura.

CAPÍTULO 23

¿Qué es el período de retorno?

El período de retorno es el tiempo promedio, en años, que se espera transcurra entre dos eventos hidrológicos de igual o mayor magnitud. Es clave en el diseño de obras civiles.

Definición

n

El **período de retorno** (T), también llamado *intervalo de recurrencia*, es el valor promedio de años que separa la ocurrencia de dos eventos hidrológicos extremos de igual o mayor magnitud. Se expresa matemáticamente como:

n

$$T = 1 / P(X \geq x)$$

n

donde $P(X \geq x)$ es la probabilidad de que el evento x sea igualado o superado en un año cualquiera.

nn

Ejemplos prácticos

n

n

- Una crecida de **T = 100 años** tiene una probabilidad de $1/100 = 1 \%$ de ocurrir en cualquier año.

n

- Una precipitación de **T = 25 años** tiene una probabilidad de 4% de ocurrir cada año.

n

n

Importante: que un evento sea "de 100 años" no significa que ocurrirá exactamente cada 100 años; puede ocurrir dos veces en el mismo año o no ocurrir durante 200 años.

nn

Uso en ingeniería civil

n

El período de retorno es el criterio de diseño más usado en hidrología aplicada:

n

n

– **Alcantarillas urbanas:** $T = 2\text{--}25$ años.

n

– **Puentes:** $T = 50\text{--}500$ años.

n

– **Presas:** $T = 1,000\text{--}10,000$ años (o Precipitación Máxima Probable – PMP).

n

nn

Distribuciones estadísticas

n

Para estimar caudales o precipitaciones asociados a un período de retorno se ajustan distribuciones de probabilidad a datos históricos, entre ellas: Gumbel (Valores Extremos Tipo I), Log-Pearson Tipo III, y Log-Normal.

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Gumbel, E. J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press.

n

- Chow, V. T. et al. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Cap. 12.

n

- U.S. Geological Survey (USGS). Flood-Frequency Analysis. *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 4, Ch. A3.

n

CAPÍTULO 24

¿Qué es una inundación?

Una inundación es el desbordamiento temporal del agua sobre terrenos normalmente secos. Es el desastre natural más frecuente del mundo y la principal motivación del diseño hidrológico de obras civiles.

Definición

n

Una **inundación** es el cubrimiento temporal de tierra normalmente seca por agua proveniente del desbordamiento de un río, lago o del mar, o de la acumulación de agua de lluvia en zonas bajas. Según la OMM y la UNESCO, es el desastre natural más frecuente y costoso del planeta.

nn

Tipos de inundación

n

n

- **Inundación fluvial (desbordamiento):** el río supera la capacidad de su cauce y ocupa la llanura de inundación (*floodplain*). Es el tipo más común y predecible.

n

- **Inundación pluvial (urbana):** el agua de lluvia supera la capacidad de absorción del suelo y del sistema de drenaje, acumulándose en calles y zonas bajas. Frecuente en ciudades impermeabilizadas.

n

- **Crecida repentina (*flash flood*):** ascenso muy rápido del nivel de agua (minutos a pocas horas) en cuencas pequeñas o de montaña tras lluvias intensas. Es la más peligrosa por su escaso tiempo de alerta.

n

- **Inundación costera:** provocada por marejadas ciclónicas, tsunamis o mareas de tormenta que impulsan agua del mar tierra adentro.

n

nn

Llanura de inundación

n

La **llanura de inundación** es la franja de terreno adyacente al cauce que puede quedar bajo agua durante crecidas. Desde el punto de vista geomorfológico, es el terreno que el río mismo ha formado y que "reclama" periódicamente. Las zonas más expuestas se delimitan mediante mapas de peligrosidad para distintos períodos de retorno ($T=10, 50, 100, 500$ años).

nn

Causas principales

n

n

- Lluvias intensas o prolongadas que superan la capacidad de infiltración y drenaje de la cuenca.

n

- Deshielo rápido de nieve o glaciares.

n

- Rotura de presas o diques.

n

- Urbanización que impermeabiliza el suelo y reduce el tiempo de concentración.

n

- Deforestación que reduce la retención de agua en la cuenca.

n

nn

Medidas de mitigación

n

n

- **Estructurales:** diques, embalses de laminación, canales de alivio, encauzamientos.

n

- **No estructurales:** mapas de riesgo, sistemas de alerta temprana, ordenamiento territorial (no construir en llanuras de inundación), seguros contra inundaciones.

n

- **Infraestructura verde:** humedales, parques inundables, pavimentos permeables que retienen el agua antes de que llegue al cauce.

n

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- WMO & GWP (2016). *Integrated Flood Management Tools Series*. WMO-No. 1135.

n

- UNDRR (2020). *The Human Cost of Disasters 2000–2019*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

n

- Chow, V. T. et al. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Cap. 15.

n

PARTE VII

Aguas Subterráneas

El agua subterránea representa el 97% del agua dulce líquida disponible en el planeta. Los acuíferos, el nivel freático y la permeabilidad son los conceptos que gobiernan este recurso oculto pero esencial.

CAPÍTULO 25

¿Qué es un acuífero? ¿Qué tipos de acuíferos hay?



¿Qué es un acuífero?

Por definición geológica un acuífero es una formación geológica, formada por una o más capas de rocas (gravas, arenas, caliza...), que alberga agua. Se caracteriza, por poseer una permeabilidad significativa y una extensión y espesor considerables. Constituyen almacenes de enormes reservas que pueden ser utilizadas, mediante obras de captación o hasta puede alcanzar naturalmente la superficie terrestre

Tipos de Acuíferos según su comportamiento hidrodinámico

Acuíferos

Corresponde a lo descrito anteriormente, es decir formaciones geológicas con buenas características para almacenar y transmitir el agua.



Acuitardos

Se trata de formaciones con buenas capacidades para almacenar agua, pero el agua es transmitida lentamente, por dar un ejemplo, los limos.



Acuicludos

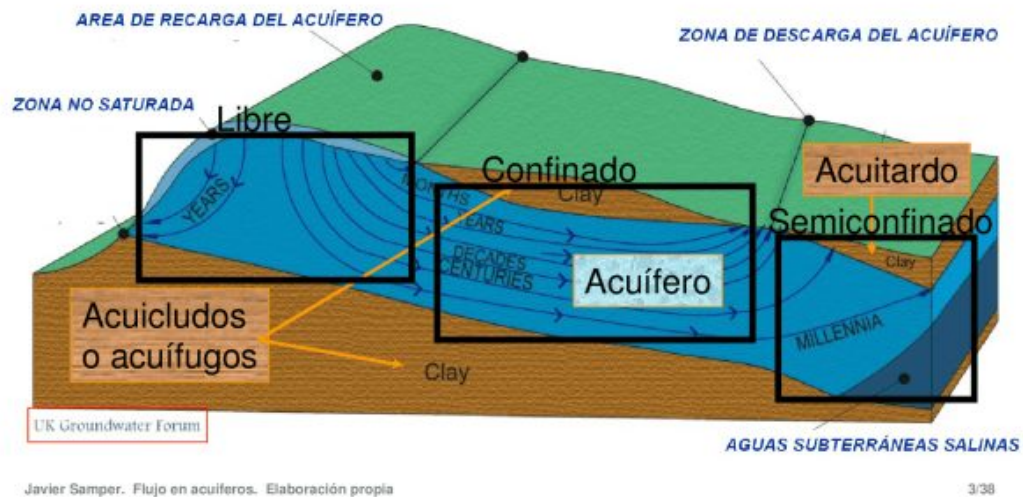
Se trata de formaciones que pueden contener agua, pero su poder de transmisión es muy baja o nula debido a su baja permeabilidad. Por dar un ejemplo, las arcillas.

Acuífugos

Corresponden a formaciones geológicas que no pueden ni almacenar agua y por lo tanto tampoco transmitirla. Por ejemplo, rocas ígneas no fisuradas ni fracturadas.

Tipos de acuíferos

Tipos de acuíferos desde el punto de vista hidráulico



Tipos de Acuíferos según su comportamiento hidráulico

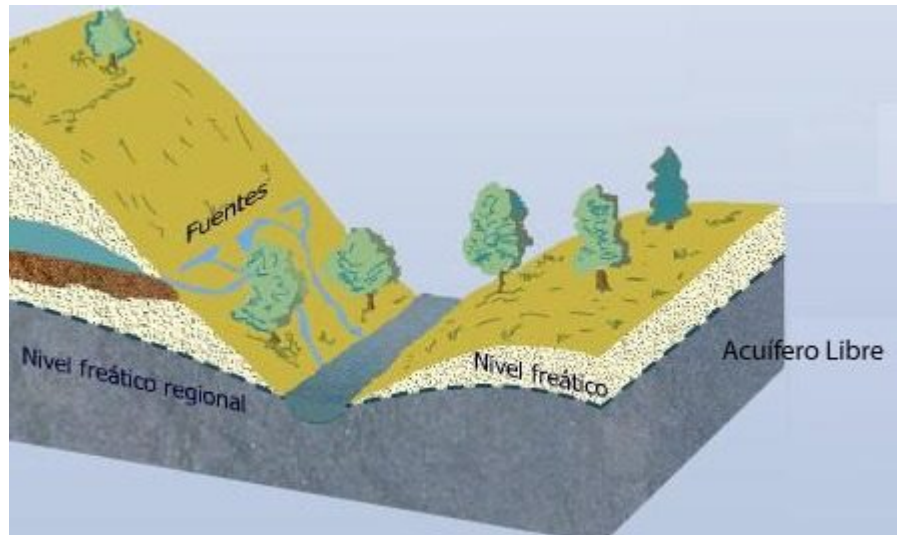
Las formaciones que contienen y transmiten agua del subsuelo reciben el nombre de acuíferos. Los tipos principales son 3:

- No confinados
- Semiconfinados
- Confinados

Aunque en algunos casos se consideran sólo 2 tipos, ya que los semi-confinados se pueden considerar como un caso de los confinados.

Acuíferos no confinados o libres

Corresponde a una formación que se ve en la imagen a continuación:

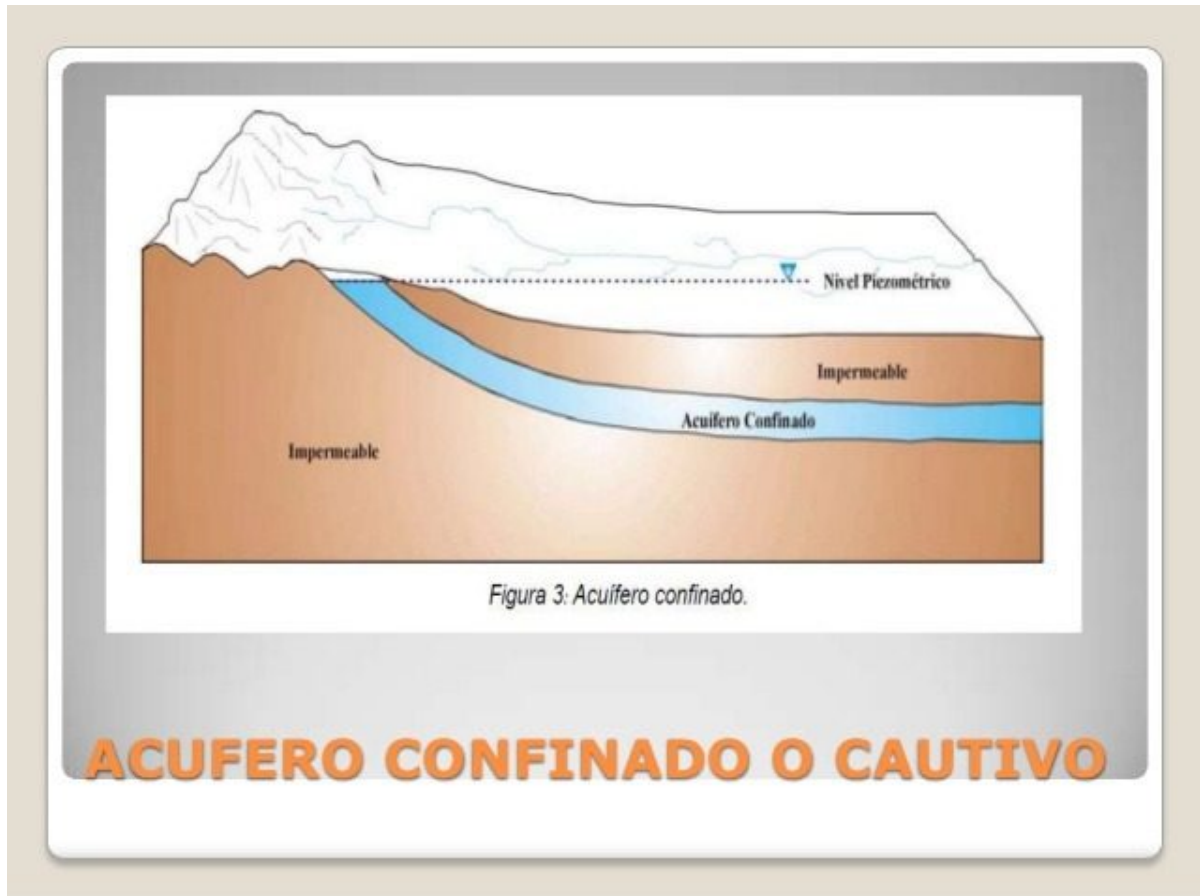


Básicamente se pueden resumir en acuíferos en donde el flujo es libre como en los canales y la línea de energía descende en el sentido del flujo. El nivel freático sigue más o menos las mismas variaciones de la superficie, aunque es importante recalcar que no siempre es así. El espesor de estos acuíferos puede ser desde unos cuantos metros hasta cientos de metros.

Estos acuíferos pueden ser considerados como verdaderos lagos subterráneos, en material poroso; como no hay restricciones en la parte superior en nivel freático es libre de subir y bajar, muchas veces estos acuíferos alimentan corrientes superficiales y lagos, y que son bastante comunes de ver en muchos ríos, con la famosa interacción entre río y acuífero.

Acuíferos confinados

Son acuíferos comprendidos entre dos estratos impermeable, el flujo por lo tanto se encuentra a presión, como en las tuberías de agua potable, se puede ver un esquema de este tipo de acuíferos en la siguiente imagen:



En consecuencia, en vez de tener un nivel freático ahora tiene un nivel piezométrico. Estos acuíferos tienen la ventaja que permiten conducir el agua a grandes distancias y entregar el agua por encima del nivel del acuífero, y las desventajas de tener áreas de recarga relativamente pequeñas, en muchas ocasiones provocan asentamientos en los lugares de extracción (pozos de bombeo).

Acuíferos semiconfinados

Se consideran un caso particular de los acuíferos confinados o también llamados cautivos, en los que muro, techo o inclusive ambos, no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua.

Fuentes:

-Hidrología para estudiantes de ingeniería civil, potencia universidad católica del Perú.

-<https://sites.google.com/site/edificacionrepelega/estructuras-de-construccion/10-nivel-freatico>

-https://es.wikipedia.org/wiki/Agua_subterr%C3%A1nea

CAPÍTULO 26

¿Qué es el nivel freático?

El nivel freático es la superficie del agua subterránea donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica. Marca el límite entre la zona no saturada y la zona saturada del suelo.

Definición

n

El **nivel freático** (o tabla de agua, *water table*) es la superficie imaginaria dentro del suelo en la que la presión del agua subterránea es igual a la presión atmosférica. Por encima de él se encuentra la *zona no saturada* (o zona vadosa), donde los poros contienen tanto agua como aire; por debajo, la *zona saturada*, donde todos los poros están llenos de agua.

nn

Variación del nivel freático

n

El nivel freático no es estático: sube y baja en respuesta a:

n

n

- **Recarga:** precipitaciones e infiltración elevan el nivel.

n

- **Descarga:** evapotranspiración, extracción por pozos y caudal base de ríos lo reducen.

n

- **Estacionalidad:** en zonas con estación seca marcada, el nivel puede descender varios metros entre verano e invierno.

n

nn

Relación con ríos y lagos

n

Un río puede ser **efluente** (el nivel freático alimenta al río → el río recibe agua subterránea) o **influyente** (el río alimenta el acuífero → el río pierde agua). Esta distinción es clave para la gestión de recursos hídricos en cuencas áridas.

nn

Medición

n

El nivel freático se mide directamente con **piezómetros** (tubos instalados en pozos de observación) o con sensores de presión sumergidos. La red de piezómetros permite trazar el *mapa potenciométrico* que muestra las líneas equipotenciales y la dirección del flujo subterráneo.

nn

Importancia en ingeniería

n

n

– **Cimentaciones:** un nivel freático alto puede reducir la capacidad portante del suelo y requerir drenaje.

n

– **Excavaciones:** al perforar por debajo del nivel freático, el agua irrumpe en la zanja (es necesario bombeo).

n

– **Contaminación:** los contaminantes disueltos migran con el flujo subterráneo siguiendo el gradiente del nivel freático.

n

- **Agricultura:** un nivel freático muy superficial puede causar encharcamiento y salinización de cultivos.

n

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.

n

- Todd, D. K. & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology*. 3rd ed. Wiley.

n

- UNESCO & WMO (2012). *International Glossary of Hydrology*. 3rd ed.

n

PARTE VIII

Sedimentos y Erosión

El agua no sólo transporta agua: también mueve millones de toneladas de sedimento cada año. La erosión hídrica degrada suelos y cuencas; el sedimento en suspensión reduce la vida útil de embalses y afecta la calidad del agua.

CAPÍTULO 27

¿Qué es la erosión hídrica?

La erosión hídrica es el proceso por el cual el agua, en forma de lluvia o escorrentía, desprende y transporta partículas de suelo. Es una de las principales causas de degradación de cuencas y reducción de la vida útil de embalses.

Definición

n

La **erosión hídrica** es el proceso de desagregación, transporte y deposición de partículas del suelo causado por el agua, ya sea en forma de lluvia directa (salpicado o "splash") o mediante la escorrentía superficial. Es la forma más extendida de degradación del suelo a nivel mundial.

nn

Tipos de erosión hídrica

n

n

– **Erosión por salpicado (splash):** el impacto de las gotas de lluvia desestructura los agregados del suelo y los proyecta en todas direcciones.

n

– **Erosión laminar:** una fina lámina de agua fluye sobre la superficie arrastrando uniformemente las partículas más finas.

n

– **Erosión en regueros (rills):** se forman pequeños canales superficiales cuando la escorrentía se concentra, aumentando su poder erosivo.

n

- **Erosión en cárcavas (gullies):** estadio avanzado donde los regueros se profundizan formando grandes surcos difíciles de recuperar.

n

- **Erosión fluvial:** el río excava y socava sus márgenes y lecho durante crecidas.

n

nn

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

n

La metodología más usada para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica es la USLE (Wischmeier & Smith, 1978):

n

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

n

n

- **A:** pérdida de suelo [ton/ha/año]

n

- **R:** factor de erosividad de la lluvia

n

- **K:** factor de erodibilidad del suelo

n

- **LS:** factor de longitud y pendiente del terreno

n

- **C:** factor de cobertura vegetal

n

- **P:** factor de prácticas de conservación

n

nn

Impactos en obras hidráulicas

n

n

- **Sedimentación de embalses:** los sedimentos transportados reducen la capacidad útil de los embalses con el tiempo.

n

- **Colmatación de canales de riego:** el sedimento se deposita en la infraestructura de conducción.

n

- **Turbidez del agua:** afecta la calidad del agua para consumo y puede dañar equipos de bombeo.

n

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses*. USDA Agriculture Handbook No. 537.

n

- Renard, K. G. et al. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: RUSLE*. USDA-ARS Agriculture Handbook No. 703.

n

- FAO (2019). *Soil Erosion: the greatest challenge to sustainable soil management*. Rome.

n

CAPÍTULO 28

¿Qué es el sedimento en suspensión?

El sedimento en suspensión es el material sólido (arcillas, limos, arenas finas) transportado por el agua sin tocar el fondo. Reduce la vida útil de embalses, afecta la calidad del agua y es indicador del estado de una cuenca.

Definición

n

El **sedimento en suspensión** es el material sólido particulado (arcillas, limos y arenas finas) que el agua transporta manteniéndolo flotante dentro de la columna de agua, sin que las partículas toquen el fondo del cauce. A diferencia del *transporte de fondo* (*bedload*), donde las partículas más gruesas ruedan o saltan sobre el lecho, el sedimento en suspensión se distribuye en toda la sección transversal del flujo.

nn

Concentración de sedimento en suspensión (CSS)

n

Se expresa en **mg/L** o **ppm** (partes por millón en masa). La descarga de sedimentos (Q_s) se calcula como:

n

$$Q_s \text{ [t/día]} = 0.0864 \cdot \text{CSS [mg/L]} \cdot Q \text{ [m}^3\text{/s]}$$

n

Los ríos tropicales y de montaña pueden alcanzar valores de CSS de miles de mg/L durante crecidas, mientras que ríos de llanura en estiaje tienen valores de unos pocos mg/L.

nn

Factores que lo controlan

n

n

- **Velocidad del flujo:** mayor velocidad → mayor capacidad de transporte y suspensión.

n

- **Turbulencia:** mantiene las partículas en suspensión oponiéndose a la sedimentación.

n

- **Granulometría:** partículas más finas (arcillas) permanecen en suspensión más tiempo.

n

- **Erosión en la cuenca:** mayor erosión hídrica en la cuenca → mayor aporte de sedimento.

n

nn

Impactos

n

n

- **Embalses:** el sedimento se deposita al disminuir la velocidad del agua al entrar al embalse, reduciendo progresivamente su capacidad útil. Es el principal problema de vida útil de presas.

n

- **Agua potable:** alta turbidez dificulta y encarece el tratamiento del agua.

n

- **Ecosistemas acuáticos:** el sedimento cubre el sustrato del fondo, reduciendo el hábitat para peces y macroinvertebrados.

n

- **Irrigación:** puede colmatar canales de riego y obstruir sistemas de goteo.

n

nn

Medición

n

Se miden con muestreadores de profundidad integrada (DH-48, D-74), turbidímetros ópticos o sensores de retrodiferencia acústica (ABS). La relación turbidez-CSS debe calibrarse localmente.

nn

Fuentes y lecturas recomendadas

n

n

- Rouse, H. (1937). Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. *Transactions ASCE*, 102, 463–543.

n

- Walling, D. E. & Webb, B. W. (1996). Erosion and sediment yield. *IAHS Publication* 236.

n

- WMO (1994). *Guide to Hydrological Practices*. 5th ed., WMO-No. 168. Cap. 5.

n

PARTE IX

Glaciología e Hidrología de Nieve

Los glaciares son reservas de agua dulce que regulan caudales en cuencas de alta montaña y regiones polares. Su comprensión es urgente en un contexto de cambio climático que amenaza su existencia.

CAPÍTULO 29

Qué son los glaciares de alta montaña



Se puede definir a los glaciares de alta montaña como una masa –o río– de hielo que fluye pendiente abajo y está encerrado o rodeado por las laderas de un valle o cumbres adyacentes. Estos se forman en zonas de montaña que tienen importantes precipitaciones de nieve.

El lecho de roca influye enormemente en la dinámica de un glaciar de montaña y en la pendiente, además, el glaciar se forma gracias a la acumulación de la nieve a gran altura.

Los glaciares de alta montaña también son conocidos como glaciar alpino o de valle debido a que están ubicados mayormente en los Alpes. Sin embargo, también están ubicados en otras cordilleras como los Andes o el Himalaya. Por consiguiente, están situados principalmente en Austria, Francia y Suiza.

Los glaciares de alta montaña se asemejan a ríos de hielo con afluencia hacia el cauce principal. Estos son posiblemente los más conocidos y tienen gran relevancia al estudiar la naturaleza. La razón es que es posible distinguir claramente las partes que conforman un glaciar.

Partes de los glaciares de alta montaña

El glaciar alpino o glaciar de montaña está compuesto por el circo glaciar, lengua glaciar y la zona de ablación:

Circo glaciar

Es básicamente la zona de recepción y acumulación de nieve. Este circo glaciar es una depresión que está rodeada de montañas y donde se acumula una gran cantidad de hielo. Cuando se compacta la nieve, se transforma en hielo y forma paredes verticales y abruptas. Esta dispone de una zona de salida para descender a niveles inferiores.



Lengua glaciar

Es cuando la masa de hielo desciende a través de la zona de salida por la ladera de la montaña. Cuando se desplaza el hielo excava la roca y la lengua glaciar se encaja en el terreno. Esto crea un valle en forma de U que se ve cuando el hielo desaparece.

Zona de ablación

Es donde el hielo se funde y provoca que de la lengua glaciar surja un torrente con fuerza. Donde termina la lengua se encuentran bloques rocosos, mientras que los más livianos son transportados por el torrente.

CAPÍTULO 30

Qué son los glaciares polares



Los glaciares polares son grandes masas de hielo que se encuentran principalmente en los polos del planeta tierra. Sin embargo, un glaciar polar también puede formarse en un planeta enano o satélite natural que esté cubierto de hielo.

En el caso del planeta tierra, están ubicados tanto en la Antártida como en el Ártico. Cuando estos glaciares cubren mesetas e islas de latitudes altas se les conoce como casquetes polares o capas de hielo.

Los glaciares polares también existen en otros planetas como Marte o Plutón, aunque los de Marte están formados por hielo seco. Los casquetes polares del planeta tierra son:

- Casquete polar ártico: ubicado en el norte y abarca prácticamente todo el océano Ártico y Groenlandia.
- Casquete polar antártico: en el sur se encuentra el casquete polar antártico. Tiene un espesor de 1,5 km y cubre más del 95% de la Antártida. Este es el más grande y grueso.

¿Cómo se forman los glaciares polares?

Se forman porque las regiones del planeta que tienen latitudes altas reciben menos radiación solar por parte del sol que las regiones ecuatoriales. Por consiguiente, hay temperaturas superficiales más bajas.

En general no hay una composición o tamaño específico para que se denomine como casquete polar, solo es preciso que esté en la región polar. Además, la composición del hielo de un glaciar polar va a variar en función de dónde esté. Por ejemplo, los de la tierra son principalmente hielo de agua, mientras que los de Marte contienen dióxido de carbono sólido.



Nombres de los glaciares polares según el lugar donde se encuentran

Hay otras formas de llamar a estos casquetes polares y dependen del lugar donde se encuentren –áreas oceánicas o continentales–:

- Inlandsis (indlandsis): son los glaciares que cubren las áreas que corresponden al continente e islas cercanas.
- Banquisa: es una capa de hielo flotante que se forma sobre los océanos polares.

Por su parte, cuando los glaciares polares son muy extensos y antiguos, reciben el nombre de capa de hielo continental. Estos generalmente fluyen hacia el exterior para alcanzar los océanos y formar icebergs cuando se fragmentan.

CAPÍTULO 31

Qué son los glaciares tropicales



Son los glaciares situados en las zonas montañosas tropicales, por lo que están ubicados en las zonas más cálidas del planeta. Por esta razón prácticamente no tienen nieve y son mucho más sensibles al cambio climático que los glaciares polares.

A pesar de que gran parte de los glaciares tropicales están en los Andes de América del Sur, también hay algunos en Indonesia o África Oriental. La distribución geográfica de los mismos es que se ubican entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio.

A manera general se consideran como un recurso natural latinoamericano, pues más del 99% se encuentra en la cordillera de los Andes. Perú es el país con mayor cantidad de glaciares tropicales, ya que cuenta con el 71% de ellos. Le sigue Bolivia con 20% y posteriormente Ecuador y Colombia con 4%.

Venezuela se une a este listado con el 0.1% de los glaciares, específicamente el glaciar Jordán, descubierto en 1991.

Retroceso de los glaciares tropicales

Los glaciares tropicales sirven como indicadores de la evolución del clima y forman parte de las reservas sólidas de agua dulce. A causa del aumento de las temperaturas por el cambio climático, los glaciares tropicales han tenido importantes retrocesos.



Según las proyecciones climáticas, es probable que la mayoría de los glaciares tropicales desaparezca a mediados de este siglo. El proceso será más rápido para los que están por debajo de los 5.000 metros sobre el nivel del mar.

El hecho de que los glaciares podrían derretirse en los próximos 30 años supone una pérdida exponencial para las personas que dependen de ellos para el agua potable. Igualmente estos glaciares sirven como una fuente para la agricultura y generación de energía eléctrica.

El deshielo de los glaciares tropicales está relacionado con el fenómeno El Niño que aparece cada 3 u 8 años para calentar las aguas del Pacífico. Tomando en cuenta que estos glaciares ya están ubicados en zonas con clima cálido todo el año, el cambio climático es más nocivo para ellos.

CAPÍTULO 32

¿Qué son los glaciares de roca?



Estos glaciares suelen formarse en las cuencas de los circos glaciales, donde hay muchos escombros y ablación de glaciares con escombros. Los glaciares de roca pueden consistir en restos de roca angular congelados en hielo intersticial, o glaciares cubiertos con talud.

Los glaciares de roca –también llamados glaciares rocosos, glaciares de escombros o litoglaciares– se encuentran normalmente en latitudes o elevaciones altas y se pueden extender hacia niveles inferiores.

Los glaciares rocosos se mueven cuesta abajo debido a la deformación de hielo, por lo que la superficie también toma una apariencia similar a la de los demás glaciares. Usualmente, estos glaciares rocosos tienen menos de un (1) metro de profundidad, pero alcanza longitudes de 3 km y 60 m de altura.

¿Cómo se forman los glaciares de roca?

Existen dos factores que generalmente están presentes para que un glaciar de roca se forme, y estos son la baja velocidad del hielo y el permafrost. Sin embargo, esta última en ocasiones no es indispensable para la formación del mismo.

Gran parte de los glaciares rocosos se crean a partir de la recesión de glaciares cubiertos de escombros. En general, estos glaciares están en circos donde los escombros caen de lados empinados y caen en el hielo. Cuando los glaciares se encogen, la composición cambia y son cubiertos por más escombros.

Así como los glaciares normales pueden revertir estos glaciares de roca por medio de la adquisición de otros materiales y propiedades, los rocosos pueden originarse a partir de restos de glaciares normales.



Tipos de glaciares de roca

La clasificación de estos glaciares se basa en la composición de hielo y roca que tienen. En general, se clasifican en 3 tipos genéticos:

- Glaciares de roca glaciogénicos: son los que se originan a partir de un glaciar normal.
- Glaciares con escombros con nieve criogénicos: son los originados de la caída de escombros o roca de avalancha.
- Gelifluxión criogénica: glaciares de roca de manto de escombros.

En algunas zonas del mundo, los glaciares de roca pueden almacenar más agua que los glaciares normales, como los situados en Chile.

CAPÍTULO 33

Qué es la sublimación de la nieve



Es un proceso meteorológico que se caracteriza por la transición del estado sólido al gaseoso y sin pasar por el estado líquido. En otras palabras, la nieve y el hielo no se transforman en agua, ya que existen estas situaciones en las que se evaporan en grandes cantidades.

Para que este proceso ocurra tiene que existir algunas condiciones climáticas como la baja humedad, vientos secos y grandes altitudes. Asimismo, es necesario que haya luz solar intensa, zonas con menor presión atmosférica, fuertes vientos y baja temperatura.

A pesar de que la sublimación de la nieve ocurre en todo el mundo, no es un proceso muy conocido. Sucede la sublimación de la nieve en sitios como glaciares, picos de la Cordillera de los Andes o el Everest.

¿Cómo se forma la sublimación de la nieve?

Algunos investigadores han observado que la sublimación ocurre en las regiones costeras de la Antártida. Los vientos que soplan hasta los márgenes del continente reducen la precipitación. Cuando se forma una capa de aire muy seca en el primer tramo de la atmósfera, los copos de nieve cambian de sólido a vapor de agua.

Las altas mesetas del continente tienen vientos fuertes y frecuentes, ya que la capa de hielo antártica es muy plana. De esta forma los vientos pueden ganar fuerza y crear una capa inferior de aire que está saturada por arriba con nieve.



Sobre ello, hay una segunda capa de aire que es aún más seca, por lo que los copos de nieve que se forman en la capa de nubes en lo alto se subliman al pasar por la segunda capa. Esto causa que haya menos precipitaciones al balance de la capa de hielo.

Efecto de la sublimación de la nieve sobre las montañas y glaciares

Cuando hay deshielo de los glaciares o grandes porciones de nieve en los polos, esto contribuye al agua de los ríos. Sin embargo, en las zonas donde existen vientos muy secos y cálidos, así como las demás condiciones para crear la sublimación, se evita por completo la fase líquida del agua.

Esto significa que por medio de la sublimación de la nieve alrededor de un 80% de lo que se iba a convertir en agua dulce pasa a transformarse directamente en gas.

CAPÍTULO 34

Qué son las barreras de nieve



Es una barrera que provoca que la nieve arrastrada por el viento se acumule en un lugar deseado. Las barreras de nieve son el resultado de un proyecto para instalar vallas que pueden usarse para detener y estudiar el proceso de derretimiento.

Instalar barreras de nieve se considera un método para disminuir la tasa de la sublimación, de manera que atrapen la nieve arrastrada por el viento y creen un reservorio artificial de nieve adicional hacia el lado contrario al viento.

Gran parte de las actividades productivas dependen de la disponibilidad de los recursos hídricos, pero estas se han visto cada vez más afectadas debido a los períodos de sequía. Es por esta razón que diversos científicos desarrollaron estructuras que contienen la nieve arrastrada por el viento.

Los modelos usados como barreras de nieve son similares a las tradicionales de madera. Para este propósito se suelen usar barreras de más de 2 metros de altura y con una longitud que depende de las cuencas.

Usualmente las barreras de nieve constan de postes horizontales que cubren poco más de la mitad del área total. Sin embargo, se deja un espacio inferior de la barrera abierto para evitar que la nieve se asiente debajo de ella.

Funcionamiento detallado de las barreras de nieve

Las barreras de nieve provocan turbulencias en el viento para que la mayor parte de su carga de nieve caiga en el lado del sotavento de la barrera. De esta forma las barreras causan que se acumule nieve y esta se desplace hacia un lugar donde sea beneficioso.



El hecho de que alrededor del 80% del agua dulce que debería precipitarse se convierte en gas por la sublimación de la nieve, ha ocasionado que se creen métodos para intentar revertir esto.

A pesar de que las barreras de nieve se usaban inicialmente solo para prevenir accidentes o evitar avalanchas, varios centros de investigación como el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) han creado barreras artificiales para mantener la nieve en el suelo por más tiempo.

Diferentes cálculos preliminares han indicado que el uso de las barreras de nieve puede bajar la tasa de sublimación y que un 65% podría ser reutilizable como agua adicional.

CAPÍTULO 35

¿Qué son los penitentes?



Estos son formaciones de hielo o nieve con formas interesantes. Se les llama penitentes por su similitud con el atuendo que los católicos usan en las procesiones. Los penitentes –o nieves penitentes– pueden medir desde unos centímetros hasta 5 metros.

De cierta forma los penitentes también son similares a un campo de agujas sobre un terreno seco. Estos son comunes en los Andes centrales y desérticos, específicamente en zonas donde hay glaciares y nieve. Por esta razón se encuentran principalmente en los Andes de Argentina y Chile con alturas sobre los 4.000 metros sobre el nivel del mar.

Cómo se forman los penitentes

La particular forma de los penitentes se debe a los vientos extremos, cambios de temperatura y la radiación solar intensa. A pesar de que la teoría de su formación se mantiene desde que Charles Darwin descubrió a los penitentes por primera vez, algunos científicos no están seguros de ello.

La idea general de la formación de un penitente es que un manto de nieve se acumula en una pequeña depresión del terreno, donde hay alta radiación solar y muy baja humedad.

Con estas condiciones, el hielo no se derrite en forma de agua, sino que se evapora directamente. A este proceso se le llama sublimación.



Cuando la nieve pasa al estado gaseoso mientras que el manto que lo rodea se va derritiendo, los rayos calientan la nieve en un ángulo particular y estas zonas se subliman más rápido.

A medida que el hielo va perdiendo masa se forman estas hendiduras curvas y como absorben más luz del sol, se derriten todavía más rápido. Al final del proceso estas hendiduras dan la impresión de que crecen hacia abajo, por lo que se acaban convirtiendo en un penitente.

A pesar de que principalmente se comenta de los penitentes en el planeta tierra, también los hay en Plutón, el planeta enano del sistema solar. Allí se han detectado formaciones similares con varios metros de longitud, incluso se cree que puede haber penitentes en una de las lunas de Júpiter.

CAPÍTULO 36

Qué es el bombardeo de nubes y para qué se puede usar



También conocido como la siembra de nubes, es una forma de manipular el clima al intentar cambiar el tipo de precipitación que cae de las nubes. El bombardeo de nubes consiste en inyectar yoduro de plata a las nubes con mayor cantidad de agua para que estas se condensen y produzcan precipitaciones.

La sustancia comúnmente usada es el yoduro de plata y el hielo seco, que es dióxido de carbono congelado. No obstante, también se ha usado en ocasiones el propano líquido.

¿Para qué se puede usar el bombardeo de nubes?

Previamente se ha comentado que la siembra de nubes se usa principalmente para aumentar la lluvia o nieve, pero también suelen usarla en aeropuertos para suprimir el granizo y la niebla.

En cuanto a su principal uso, este bombardeo de nubes nació en 1946 y el objetivo es poder combatir los períodos de sequía. Por esta razón es común que muchos países alrededor del mundo opten por este método para intentar manipular el clima.

¿Cómo funciona el bombardeo de nubes?

Es necesario que las nubes tengan agua líquida por debajo de los cero grados Celsius. Cuando se introduce en la nube yoduro de plata, induce a una congelación por medio de la nucleación de cristales de hielo.



El bombardeo de nubes puede hacerse desde un avión o por dispositivos de dispersión desde el suelo. Sea cual sea el método, cuando se aplica yoduro de plata se produce un efecto físico y el yoduro actúa como agente de congelamiento.

Posteriormente el agua pasa al estado sólido y se produce una liberación de calor latente. En consecuencia, se calienta la nube y aumenta su inestabilidad de precipitaciones en hasta un 20%.

Efectos del bombardeo de nubes sobre la salud y ecosistema

El yoduro de plata es dañino cuando se está expuesto a él de manera continua, pues empieza a ser tóxico a partir de las 50 partes por millón. Durante el bombardeo de nubes se usan concentraciones de máximo 0,1 partes por millón. Por lo tanto, el impacto sobre el suelo, vegetación o seres vivos es insignificante.

PARTE X

Cuerpos de Agua, Zonas Especiales e Infraestructura

El territorio hidrológico no se reduce a ríos y cuencas: esteros, lagunas, acequias y norias forman parte del patrimonio hídrico. La hidrología urbana y las instituciones de gestión completan este panorama.

CAPÍTULO 37

¿Qué es un estero?



Es bastante común encontrarse con un estero cuando se trabaja en hidrología, pero ¿Qué es un estero? ¿Es lo mismo que un pantano? Pues ahora lo definiremos mejor, para comenzar revisaremos Wikipedia que nos dice:

El término estero se utiliza en varios contextos ecológicos y geográficos para designar condiciones de pantano generalmente en zonas planas con drenaje imperfecto. Como estero también se designa a una extensión pantanosa de gran tamaño que suele llenarse de agua por la lluvia (anegación) o por desborde de un río o laguna durante las crecientes (inundación)

Entonces en términos sencillos de explicar, el concepto de “estero” corresponde a condiciones de pantano en zonas planas con drenaje imperfecto. Sin embargo la definición no termina ahí, ya que un estero también puede ser un terreno pantanoso debido a filtración de aguas de un río o laguna, inclusive por precipitaciones que no filtran bien, generando las condiciones pantanosas y dando lugar a un estero.

Imagen: Estero Pocuro, Chile.

Es importante mencionar que el término también tiene otras acepciones, que dependen del contexto geográfico y ecológico del que se ubique, por ejemplo:

- El Iberá, Argentina : Lo definen como una laguna permanente (inclusive semi-permanente) de poca profundidad y con poca superficie de agua libre y sin movimiento.
- Venezuela y Colombia: Lo definen como las depresiones existentes en la zona de Los Llanos, en la cuenca del río Orinoco. Depresiones las cuales reciben agua de las precipitaciones en invierno, reservándose el agua para sequías posteriores.
- España : Lo definen como los lagos artificiales de agua salada, hechos precisamente para la explotación de la sal.

Esperamos que esta entrada te haya sido de ayuda, te invitamos a conocer más sobre hidrología en nuestro sitio. Fuente: <http://geografia.laguia2000.com/>

CAPÍTULO 38

¿Qué es una laguna costera?

Las lagunas costeras: definición y características clave.



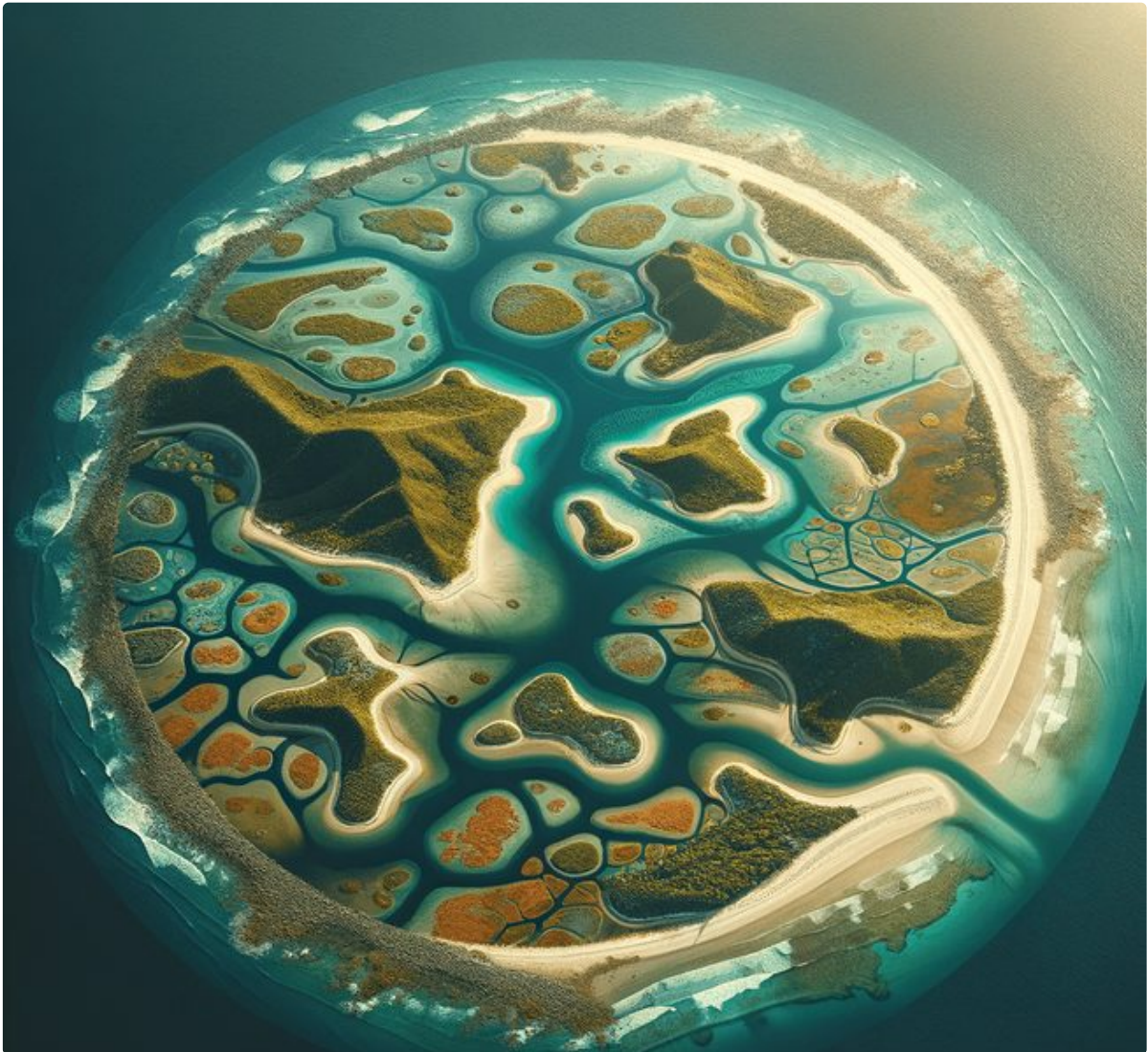
Las lagunas costeras son cuerpos de agua que se forman en la interfaz entre los ecosistemas terrestres y marinos. Estas formaciones naturales son cruciales para la biodiversidad y desempeñan roles esenciales en la ecología local y global. A continuación, exploraremos en detalle qué son las lagunas costeras, sus características distintivas, y por qué son tan importantes desde un punto de vista ecológico.

Definición y características de las lagunas costeras

Las lagunas costeras son cuerpos de agua salada o salobre que se encuentran parcialmente separados del océano por una barrera natural como islas barrera, arrecifes de coral, o dunas de arena. Estas formaciones pueden variar en tamaño desde pequeñas charcas

hasta grandes cuerpos de agua que cubren varios kilómetros cuadrados. La conexión con el océano puede ser a través de canales o entradas estrechas, lo que facilita el intercambio de agua y nutrientes entre ambos ecosistemas. Una característica distintiva de las lagunas costeras es su variabilidad en salinidad, que puede cambiar drásticamente debido a factores como la entrada de agua dulce de ríos o la evaporación intensa. Este ambiente fluctuante crea un hábitat único que puede soportar una diversidad de organismos adaptados a estas condiciones cambiantes. Además, las lagunas costeras suelen tener zonas de aguas someras, lo que permite la penetración de la luz solar hasta el fondo, promoviendo la producción primaria a través de la fotosíntesis. Las lagunas costeras también presentan una estructura geomorfológica que puede incluir marismas, manglares, praderas de pastos marinos, y áreas de sedimentos blandos. La interacción entre estos diferentes hábitats favorece la existencia de una gran variedad de especies, desde microorganismos hasta aves migratorias y mamíferos marinos. El sedimento y los nutrientes transportados por las corrientes fluviales y las mareas crean un ambiente fértil que es esencial para muchos procesos biológicos.

Importancia ecológica y funciones de las lagunas costeras



Las lagunas costeras desempeñan un papel crucial en la ecología local y global debido a su alta productividad y biodiversidad. Estos cuerpos de agua actúan como zonas de crianza para muchas especies de peces y crustáceos, que dependen de las condiciones protegidas y ricas en nutrientes para su desarrollo temprano. Además, la vegetación acuática que se encuentra en estos entornos sirve como refugio y fuente de alimento para una variedad de organismos. Otro aspecto importante de las lagunas costeras es su capacidad para actuar como filtros naturales, atrapando sedimentos y contaminantes antes de que lleguen al océano abierto. Este proceso de filtración ayuda a mantener la calidad del agua y protege los arrecifes de coral y otros ecosistemas marinos sensibles. Además, las lagunas costeras son zonas de captura de carbono, donde la vegetación y los sedimentos almacenan grandes cantidades de carbono, contribuyendo así a la mitigación

del cambio climático. Las lagunas costeras también tienen un valor económico significativo debido a su contribución a la pesca, el turismo y la recreación. La abundancia de vida marina y la belleza escénica de estos entornos atraen a turistas y generan ingresos para las comunidades locales. Además, las lagunas costeras pueden proporcionar servicios de protección costera, actuando como amortiguadores naturales contra tormentas y oleajes, lo que reduce el riesgo de erosión y daños en las áreas circundantes. En resumen, las lagunas costeras son sistemas complejos y dinámicos que desempeñan múltiples funciones ecológicas y económicas. Su capacidad para sustentar una rica biodiversidad, actuar como filtros naturales y mitigar el cambio climático subraya su importancia para la salud del planeta. Proteger y gestionar adecuadamente estos valiosos ecosistemas es esencial para asegurar su sostenibilidad a largo plazo y los beneficios que proporcionan a la humanidad y al medio ambiente.

CAPÍTULO 39

¿Qué es el ciclo hidrológico urbano?

El ciclo hidrológico urbano y su importancia en ciudades.



En el contexto de la hidrología, el ciclo hidrológico urbano se refiere a la serie de procesos a través de los cuales el agua se mueve y se transforma en un entorno urbano. Este ciclo es esencial para entender cómo las ciudades manejan sus recursos hídricos y cómo el desarrollo urbano afecta el medio ambiente. El ciclo hidrológico urbano presenta características distintivas que lo diferencian del ciclo natural debido a la influencia significativa de las actividades humanas.

Definición del Ciclo Hidrológico Urbano

El ciclo hidrológico urbano es una variante del ciclo hidrológico natural, adaptado a las condiciones y necesidades específicas de las áreas urbanas. En las ciudades, el ciclo

hidrológico incluye procesos adicionales y modificados debido a la presencia de infraestructura construida y la alta densidad de población. La urbanización altera la dinámica natural del agua, afectando el flujo, almacenamiento y calidad del recurso hídrico. En términos generales, el ciclo hidrológico urbano implica la captación, distribución, consumo y posterior tratamiento del agua. Las fuentes de agua en el entorno urbano pueden incluir ríos, lagos, acuíferos subterráneos y, en algunos casos, agua desalinizada. Tras su uso, el agua residual debe ser tratada adecuadamente antes de ser devuelta al medio ambiente o reutilizada. Este proceso de tratamiento es crucial para mantener la calidad del agua y prevenir la contaminación. Además, el ciclo hidrológico urbano está influenciado por varios factores, como el cambio climático, la expansión urbana y las políticas de gestión del agua. La infraestructura, como los sistemas de alcantarillado, plantas de tratamiento de aguas residuales y sistemas de drenaje pluvial, juega un papel fundamental en la gestión del ciclo. La capacidad de estas infraestructuras para manejar eventos extremos, como inundaciones o sequías, es un desafío continuo para las ciudades modernas.

Componentes Clave y Procesos Involucrados



Uno de los componentes clave del ciclo hidrológico urbano es la captación y almacenamiento del agua. Este proceso comienza con la recolección de agua de diversas fuentes, como ríos y embalses, que luego se almacenan en instalaciones adecuadas para su distribución. El almacenamiento puede incluir reservorios subterráneos y tanques elevados, diseñados para asegurar un suministro constante de agua potable a la población urbana. La distribución del agua es otro componente crítico. Incluye una red compleja de tuberías y bombas que transportan el agua desde las instalaciones de almacenamiento hasta los hogares, industrias y otros puntos de uso. Este sistema debe ser eficiente y confiable, minimizando las pérdidas y garantizando la calidad del agua suministrada. Las

tecnologías avanzadas, como los sistemas de monitoreo y control automatizado, son esenciales para optimizar la distribución y detectar problemas en tiempo real. El tratamiento y manejo de las aguas residuales constituyen un proceso fundamental dentro del ciclo hidrológico urbano. Las aguas residuales generadas por los hogares, industrias y actividades comerciales deben ser recolectadas y tratadas en plantas especializadas. El tratamiento adecuado elimina contaminantes, asegurando que el agua tratada pueda ser devuelta al medio ambiente sin causar daños ecológicos. Además, las aguas tratadas pueden ser reutilizadas para riego, recarga de acuíferos y otros usos no potables, contribuyendo a la sostenibilidad del recurso hídrico urbano. En resumen, el ciclo hidrológico urbano es un proceso complejo y multifacético que es esencial para la vida en las ciudades modernas. La gestión eficaz de este ciclo requiere una comprensión profunda de sus componentes y procesos, así como una infraestructura robusta y políticas adecuadas. Con el aumento de la población urbana y los retos asociados al cambio climático, la mejora de la eficiencia y sostenibilidad del ciclo hidrológico urbano es más crucial que nunca. Mediante la adopción de tecnologías avanzadas y prácticas de gestión integradas, las ciudades pueden asegurar un suministro de agua seguro y sostenible para las generaciones futuras.

CAPÍTULO 40

¿Qué es una acequia?



En términos simples, una acequia es una zanja o canal construido para conducir las aguas de riego u otros fines, impulsados por la gravedad, el concepto es muy similar al de un canal, normalmente consiste en surcos en el suelo natural o roca, aunque se puede revestir con concreto.

Las acequias se pueden categorizar en:

Acequia principal: toma agua desde la fuente de agua.

Acequia secundaria o ramal: sale de la acequia principal, lleva el agua algún predio u otro lugar alejado de la acequia principal.

¿En la práctica cómo se diferencia normalmente con un canal por ejemplo?

En mi experiencia personal, el termino se puede ocupar como sinónimo de un canal, pero normalmente se ocupa para describir a ramales secundarios, es decir obras de menor tamaño, que se pueden generar una pala por una persona como, esto lo dejo en claro que corresponde a mi criterio personal.

Referencias:

<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/dictionary-water-terms>

CAPÍTULO 41

¿Qué es una noria (pozo)?





A diferencia de los llamados pozos profundos, la noria es una obra de captación de aguas subterráneas que no se encuentran contenidas en un acuífero, que provienen de las filtraciones de cauces naturales o artificiales o de napas subsuperficiales de drenaje natural del suelo en las posiciones más altas. Las norias son generalmente de sección circular y tienen un diámetro de entre 1 a 3 metros aproximadamente, mientras que su profundidad está entre los 5 y los 15 metros, profundidad que depende en gran medida de la estabilidad de las paredes y de la cantidad de agua que aflore.

En situaciones de sequía prolongada (o cuando se necesita mayor volumen de agua por distintos motivos) las norias generalmente se profundizan hasta llegar a los 20 a 25 metros.

El revestimiento:

El revestimiento de la noria siempre es aconsejable, ya que es necesaria la protección al desmoronamiento por empujes que se produzcan en el suelo (estático o sísmico). En términos generales los caudales extraídos a través de norias, pueden variar desde

caudales bastantes bajos (entre 0,11 a 1,15 l/s), hasta caudales un poco más elevados y constantes (del orden de 2 a 6 l/s) en zonas de mayor pluviometría.

Elementos generales de una noria:

- El pozo o excavación
- La obra de revestimiento
- La bomba y sus accesorios

Como construir un pozo para aprovechar una noria

La excavación del pozo se puede hacer de forma manual, se recomiendan unos 3 jornales para el comienzo, que se releven en turnos cortos entre la labor de superficie y faena de excavación. A medida que avanza la profundidad de la excavación, y con ello la dureza del terreno, los rendimientos de la mano de obra bajan considerablemente, hasta 1-3 días por metro excavado.

En caso en que esperamos encontrar agua a una profundidad de entre 6 a 9 metros se recomienda la excavación con máquina retroexcavadora, ya que se obtienen rendimientos de entre 6 a 10 m³ de excavación por hora, terminando toda la faena en sólo un día (con las limitaciones de profundidad de la maquinaria). Para la extracción se utilizan bombas centrífugas, con motor bencinero o motobombas de baja potencia (0.5 a 1.5 HP) conectadas a la red eléctrica domiciliaria (siempre que la altura de aspiración sea inferior a 6 metros).

CAPÍTULO 42

¿Qué es una Junta de Vigilancia?



Las Juntas de Vigilancia son organizaciones de usuarios de aguas (particulares, todos los titulares de derechos de aguas) que se constituyen en torno de cauces naturales y están amparadas bajo el código de aguas de Chile. Las juntas de vigilancia tienen competencia hasta la bocatoma de los canales que extraen las aguas en el cauce natural y se ven fortalecidas por las pocas atribuciones directivas u ordenadores, que respecto a ello tiene la Dirección General de Acción (DGA), que sólo en casos extraordinarios (extrema sequía, faltas o abuso en la distribución de las aguas) puede suspender transitoriamente sus atribuciones o en su defecto intervenirlas.

El código de aguas establece en su artículo 263:

"Las personas naturales o jurídicas y las organizaciones de usuarios que en cualquier forma aprovechen aguas de una misma cuenca u hoyo hidrográfica, podrán organizarse como Junta de Vigilancia".

Es importante también mencionar que a una Junta de Vigilancia, le corresponde la facultad y obligación de regir y cuidar no sólo las aguas a que tienen derecho sus miembros, sino que velar por todos los cauces naturales bajo su jurisdicción. En la práctica dicha administración consiste en determinar cuánta agua se repartirá a cada uno de sus socios, monitorear la calidad de la misma, velar por la conservación de dicha cuenca y resolver, preventivamente y antes de su judicialización, los conflictos que de ello se deriven

En resumen, las juntas de Vigilancia tienen por finalidad administrar y distribuir las aguas a que tienen derecho a sus miembros; explotar y conservar las obras de aprovechamiento común, y realizar los demás fines que les encomienden la ley y sus estatutos

CAPÍTULO 43

¿Qué es un canal de riego?

Los canales de riego: función y aplicaciones agronómicas.



Los canales de riego son estructuras fundamentales en la agricultura y la gestión de recursos hídricos, diseñadas para transportar agua desde fuentes naturales o artificiales hasta áreas agrícolas, jardines y otros terrenos que requieren irrigación. Este artículo explorará en profundidad qué es un canal de riego, sus funciones esenciales y los componentes principales que lo conforman, proporcionando una visión comprensiva sobre su importancia y funcionamiento.

Definición y Función de un Canal de Riego

Un canal de riego es una infraestructura hidráulica construida para transportar agua de manera controlada desde una fuente de abastecimiento, como ríos, embalses o pozos,

hacia las áreas que requieren irrigación. Estos canales pueden ser naturales o artificiales y se diseñan considerando diversos factores como la topografía del terreno, la cantidad de agua necesaria y las características específicas de los cultivos que se van a regar. El objetivo principal es garantizar una distribución eficiente y sostenible del agua, minimizando pérdidas y asegurando que llegue de forma adecuada a todos los puntos necesarios. La función principal de un canal de riego es la distribución del agua para la irrigación agrícola, lo cual es esencial para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Además, estos canales pueden desempeñar roles adicionales, como la regulación del flujo de agua para evitar inundaciones y la gestión de recursos hídricos en zonas donde la disponibilidad de agua es limitada. En regiones áridas o semiáridas, los canales de riego son cruciales para la supervivencia de la agricultura y, por ende, para la economía local y la seguridad alimentaria. Otro aspecto importante de los canales de riego es su capacidad para mejorar la eficiencia del uso del agua en la agricultura. Mediante un diseño adecuado y la implementación de tecnologías de control de flujo, es posible reducir desperdicios y optimizar la cantidad de agua utilizada en cada fase del riego. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también permite a los agricultores maximizar el rendimiento de sus cultivos y reducir costos operativos.

Componentes Principales de un Canal de Riego



Un canal de riego consta de varios componentes principales que trabajan en conjunto para asegurar el transporte eficiente y controlado del agua. El componente más básico es el propio canal, que puede ser de tierra, concreto, piedra o incluso tubos de polietileno en instalaciones más modernas. La elección del material depende de factores como el presupuesto, la durabilidad requerida y las condiciones ambientales del área específica. Los mecanismos de control de flujo son otro componente esencial. Estos incluyen compuertas, válvulas y vertederos que permiten regular la cantidad de agua que ingresa y sale del canal en diferentes puntos a lo largo de su recorrido. Estos mecanismos son cruciales para mantener un flujo constante y evitar tanto la sobreirrigación como la falta

de agua en los cultivos. En sistemas más avanzados, se pueden utilizar sensores y sistemas automatizados para monitorear y ajustar el flujo de agua en tiempo real. Además, los canales de riego suelen estar equipados con estructuras de distribución secundaria y terciaria, como acequias y tuberías que llevan el agua desde el canal principal hasta los campos específicos. Estas estructuras son vitales para asegurar que el agua llegue de manera uniforme a todas las áreas de cultivo, minimizando pérdidas y optimizando la eficiencia del sistema de riego en su totalidad. El diseño adecuado de estas estructuras complementarias es clave para maximizar la eficacia del canal de riego y adaptar su funcionamiento a las necesidades específicas de cada terreno agrícola. En resumen, los canales de riego son elementos esenciales para la agricultura y la gestión eficiente de los recursos hídricos. Su correcta definición y función permiten una distribución controlada y sostenible del agua, vital para el desarrollo de los cultivos y la economía agrícola. Los diversos componentes que forman parte de un canal de riego, desde el canal principal hasta los mecanismos de control de flujo y las estructuras de distribución, trabajan en conjunto para garantizar una irrigación eficiente y optimizada. En un contexto donde el uso responsable del agua es cada vez más crucial, la implementación y el mantenimiento adecuados de los canales de riego son indispensables para asegurar la sostenibilidad y productividad agrícola.

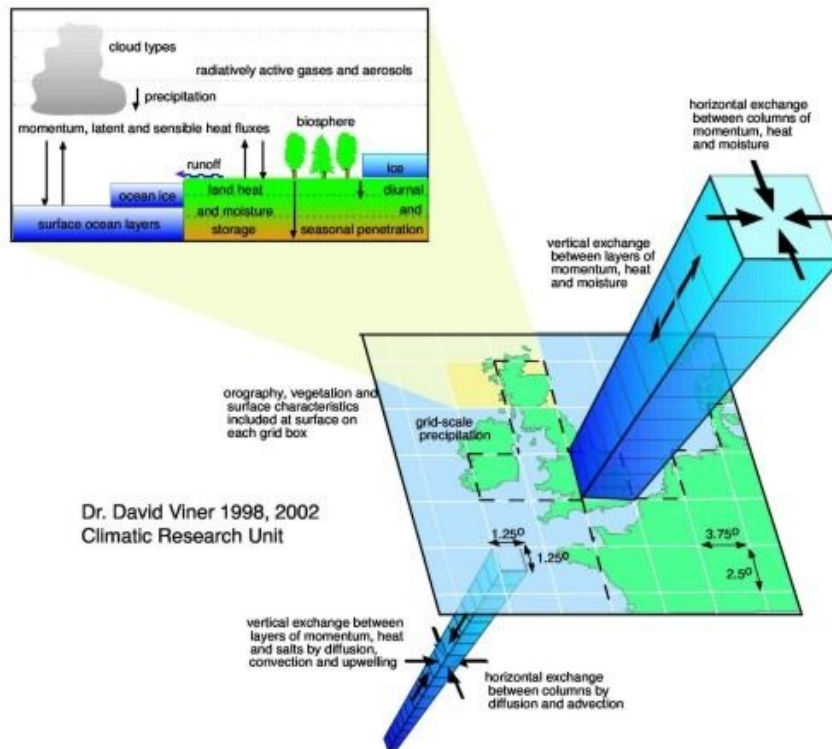
PARTE XI

Tecnología, Modelos y el Futuro del Agua

La hidrología moderna dispone de herramientas poderosas: modelos de circulación global, sensores remotos, inteligencia artificial y plataformas de gestión digital. Estas tecnologías permiten anticipar y gestionar el ciclo del agua a escala planetaria.

CAPÍTULO 44

¿Qué es un Modelo GCM - Modelos de Circulación General?



Los modelos numéricos (Modelos de Circulación General o GCMs en inglés), representan procesos físicos en la atmósfera, océano, criósfera y superficies terrestres. Estos modelos son la herramienta disponible más avanzada para simular la respuesta de un sistema global en el incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero. Mientras modelos más simple también han sido usados para proveer estimaciones globales -o regionales- promedio de la respuesta del clima, solo los modelos GCMs, posiblemente en conjunto con modelos regionales, tiene el potencial para proveer estimaciones geográficamente y físicamente consistente del cambio regional que son requerido en los análisis de impacto. Los modelos GCMs representan el clima, usando una malla tridimensional sobre el globo (ver abajo), típicamente teniendo una resolución horizontal de entre 250 y 600 km, 10 a 20 capas verticales in la atmosfera y algunas veces tantas como 30 capas en los oceanos. Su resolución es entonces bastante tosca a escala de exposición en la mayoría de las evaluaciones de impacto de los gases de efecto invernadero.

dero. Además, muchos procesos físicos, como los relacionados con las nubes, también se producen a escalas mucho más pequeñas y no pueden modelarse correctamente. En su lugar, sus propiedades conocidas deben promediarse a mayor escala en una técnica conocida como parametrización. Esta es una gran fuente de incertidumbre en las simulaciones basadas en GCM del clima futuro. Fuente: http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html

CAPÍTULO 45

Hidroinformática: El H2O Digital que Revoluciona el Mundo

Hidroinformática: Revolución H2O Digital en Acción



La tecnología ha cambiado nuestras vidas de maneras que nunca hubiéramos imaginado hace tan solo unas décadas. Desde smartphones hasta inteligencia artificial, la revolución digital está en todas partes. Pero hay una área que a menudo pasa desapercibida en esta transformación tecnológica: el agua. Sí, has leído bien. Hoy vamos a sumergirnos en el fascinante mundo de la hidroinformática, un campo emergente que combina el poder del agua con la magia del software para crear soluciones innovadoras.

Hidroinformática: Tecnología que Fluye Digitalmente

La hidroinformática no es solo un término técnico; es una filosofía que encarna cómo usamos la tecnología para entender y gestionar el agua. Imagina poder predecir inundaciones con la misma precisión con la que el meteorólogo predice el clima. Gracias a la hidroinformática, esto ya es posible. Utiliza modelos matemáticos y simulaciones com-

putacionales para analizar el flujo del agua, permitiendo a los científicos y a los ingenieros anticipar y mitigar desastres naturales.

Pero no se queda ahí. La hidroinformática también busca optimizar el uso del agua en la agricultura, uno de los sectores que más consume este recurso. Con sensores y sistemas de riego inteligentes, es posible monitorear en tiempo real la necesidad hídrica de los cultivos y ajustar la irrigación de manera precisa. Así, no solo se ahorra agua, sino que también se mejora la productividad agrícola. Es un win-win.

Además, la hidroinformática tiene un papel crucial en la gestión de recursos hídricos urbanos. Las ciudades inteligentes del futuro no solo serán eficientes energéticamente, sino también hídricamente. Sistemas avanzados permitirán detectar fugas en tuberías, gestionar la demanda de agua y asegurar que el suministro sea constante y de alta calidad. Todo esto, gracias a la integración de tecnologías digitales con la infraestructura hídrica existente.

Revoluciones Líquidas: El Futuro del Agua Inteligente

Así como el internet de las cosas (IoT) ha hecho nuestras casas más inteligentes, la hidroinformática está en camino de convertir nuestro manejo del agua en algo futurista. Imagina un mundo donde los sistemas de agua se comunican entre sí, intercambiando información para optimizar su funcionamiento. Este no es un sueño lejano; ya hay proyectos piloto que están haciendo esto una realidad. Mediante la interconexión de sensores, actuadores y plataformas de análisis de datos, estamos creando un ecosistema hídrico verdaderamente inteligente.

Un ejemplo impresionante es el uso de drones para monitorear cuerpos de agua. Estos dispositivos pueden medir la calidad del agua, detectar contaminantes y recopilar datos que luego son analizados por algoritmos avanzados. Esta información es crucial para tomar decisiones informadas sobre la gestión de recursos hídricos. Imagina poder limpiar un lago contaminado antes de que el problema se vuelva crítico, todo gracias a la tecnología.

Y no podemos olvidar la dimensión social de la hidroinformática. En lugares donde el acceso al agua potable es limitado, esta tecnología puede ser un salvavidas, literalmente. Sistemas de monitoreo y distribución optimizados pueden asegurar que el agua llegue a

comunidades remotas de manera eficiente y segura. La hidroinformática tiene el potencial de cerrar la brecha hídrica, llevando este recurso vital a quienes más lo necesitan.

La hidroinformática está redefiniendo nuestra relación con el agua, llevándonos hacia un futuro donde la tecnología y la sostenibilidad van de la mano. Este H2O digital no solo promete hacer nuestras vidas más fáciles, sino también más responsables y equilibradas con el medio ambiente. Así que la próxima vez que bebas un vaso de agua o riegues tu jardín, recuerda que detrás de estos simples actos podría haber una red compleja y sofisticada de tecnologías trabajando para ti. Como una gota en un inmenso océano, cada avance en hidroinformática cuenta y juntos estamos navegando hacia un mañana más brillante y más azul.

Apéndice A — Valores del coeficiente n de Manning

El coeficiente **n de Manning** representa la resistencia al flujo de una superficie de cauce o canal. Su selección correcta es crítica para cualquier cálculo hidráulico mediante la ecuación de Manning ($Q = (1/n) \cdot A \cdot R^{(2/3)} \cdot S^{(1/2)}$). Los valores indicados son rangos típicos según la literatura especializada (Chow, 1959; French, 1985; WMO, 2010). Se recomienda calibrar con datos de aforo cuando sea posible.

Tabla A.1 — Valores típicos de n de Manning

Tipo de superficie	n de Manning
Canal de hormigón liso	0.012 – 0.014
Canal de hormigón rugoso	0.015 – 0.018
Canal de mampostería	0.017 – 0.030
Canal de tierra, limpio y recto	0.022 – 0.026
Canal de tierra con vegetación leve	0.025 – 0.033
Canal de tierra con vegetación densa	0.035 – 0.060
Río natural, lecho de arena/grava, limpio	0.025 – 0.035
Río natural, lecho de grava/piedra	0.030 – 0.045
Río con vegetación ribereña moderada	0.035 – 0.050
Río con vegetación ribereña densa	0.060 – 0.100
Llanura de inundación, pasto/cultivo	0.030 – 0.050
Llanura de inundación, bosque denso	0.080 – 0.160
Alcantarilla circular de hormigón	0.011 – 0.013
Alcantarilla de acero corrugado	0.019 – 0.024

Fuentes: Chow (1959), *Open-Channel Hydraulics*; French (1985), *Open-Channel Hydraulics*; Ven Te Chow et al. (1988), *Applied Hydrology*.

Apéndice B — Valores del Número de Curva (CN)

Los valores de CN de la tabla siguiente corresponden a la **condición de humedad antecedente media (AMC II)** definida por el método SCS/NRCS. Para condición seca (AMC I) el CN disminuye; para condición húmeda (AMC III) aumenta. Los **grupos hidrológicos de suelo** se definen por su tasa de infiltración mínima: A (>7.5 mm/h), B (3.8–7.5 mm/h), C (1.3–3.8 mm/h) y D (<1.3 mm/h).

Tabla B.1 — Valores de CN por uso del suelo y grupo hidrológico (AMC II)

Uso/Cobertura del suelo	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Tierra cultivada sin conservación	72	81	88	91
Tierra cultivada con conservación	62	71	78	81
Praderas, condición pobre	68	79	86	89
Praderas, condición buena	39	61	74	80
Bosque, cobertura pobre	45	66	77	83
Bosque, cobertura media	36	60	73	79
Bosque, cobertura buena	30	55	70	77
Zona residencial (lotes 500 m ²)	57	72	81	86
Zona residencial (lotes 1000 m ²)	54	70	80	85
Zona comercial/industrial	89	92	94	95
Superficies pavimentadas impermeables	98	98	98	98
Superficies pavimentadas permeables	39	61	74	80
Agua: lagos, embalses, pantanos	100	100	100	100

Fuente: USDA-NRCS (2004), *National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 9*.

Apéndice C — Bibliografía General

Las siguientes referencias corresponden a las fuentes citadas a lo largo del libro, organizadas alfabéticamente por primer autor.

- [1] **Bear, J.** (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier.
- [2] **Chow, V.T.** (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- [3] **Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W.** (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- [4] **Darcy, H.** (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont, París.
- [5] **FAO** (2019). *Soil Erosion: the greatest challenge to sustainable soil management*. FAO, Roma.
- [6] **Freeze, R.A.; Cherry, J.A.** (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
- [7] **French, R.H.** (1985). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- [8] **Gumbel, E.J.** (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press.
- [9] **Hillel, D.** (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press.
- [10] **Horton, R.E.** (1940). *An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity*. Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 5.
- [11] **ISO 748** (2007). *Hydrometry — Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*. ISO.
- [12] **Kirpich, Z.P.** (1940). *Time of concentration of small agricultural watersheds*. Civil Engineering, 10(6).
- [13] **Manning, R.** (1891). *On the flow of water in open channels and pipes*. Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 20.
- [14] **Organización Meteorológica Mundial (OMM/WMO)** (2010). *Manual on Stream Gauging*. WMO-No. 1044.
- [15] **Organización Meteorológica Mundial (OMM/WMO); APFM/Deltares** (2016). *Selecting Measures and Designing Strategies for Integrated Flood Management*. WMO-No. 1135.
- [16] **Ponce, V.M.; Hawkins, R.H.** (1996). *Runoff curve number: Has it reached maturity?*. Journal of Hydrologic Engineering, 1(1).
- [17] **Renard, K.G. et al.** (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: RUSLE*. USDA-ARS Agriculture Handbook No. 703.

- [18] **Sherman, L.K.** (1932). *Streamflow from rainfall by unit-graph method*. Engineering News Record, 108.
- [19] **Thorntwaite, C.W.; Mather, J.R.** (1955). *The water balance*. Publications in Climatology, 8(1).
- [20] **Todd, D.K.; Mays, L.W.** (2005). *Groundwater Hydrology*. Wiley, 3.^a ed..
- [21] **Témez, J.R.** (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en Pequeñas Cuencas Naturales*. MOPU, Madrid.
- [22] **UNESCO; WMO** (2012). *International Glossary of Hydrology*. 3.^a ed..
- [23] **USDA-NRCS** (2004). *National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology, Chapter 9*. USDA.
- [24] **Walling, D.E.; Webb, B.W. (eds.)** (1996). *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*. IAHS Publication 236.
- [25] **Wischmeier, W.H.; Smith, D.D.** (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses*. USDA Agriculture Handbook No. 537.

Apéndice D — Glosario de Términos

Definiciones breves de los conceptos tratados en este libro, ordenadas alfabéticamente. Para las definiciones completas y su contexto, consulte el capítulo correspondiente.

Hidroinformática: El H2O Digital que Revoluciona el Mundo

Hidroinformática: Revolución H2O Digital en Acción

Qué es el aforo de caudales

El aforo es la medición del caudal en un curso de agua. Es la operación fundamental de la hidrología aplicada: sin datos de caudal no es posible diseñar obras hidráulicas ni gestionar recursos hídricos.

Qué es el balance hídrico

El balance hídrico es la ecuación fundamental de la hidrología: relaciona la precipitación con la escorrentía, la evapotranspiración, la infiltración y el cambio en el almacenamiento de agua en una cuenca.

Qué es el caudal

El caudal es el volumen de agua que pasa por una sección por unidad de tiempo. Es el parámetro central de la hidráulica aplicada. Aprende sus unidades y cómo se mide.

Qué es el ciclo hidrológico urbano

El ciclo hidrológico urbano y su importancia en ciudades.

Qué es el nivel freático

El nivel freático es la superficie del agua subterránea donde la presión del agua es igual a la presión atmosférica. Marca el límite entre la zona no saturada y la zona saturada del suelo.

Qué es el número de curva (CN)

El número de curva (CN) es un parámetro del método SCS/NRCS que resume en un solo valor la capacidad de una cuenca para generar escorrentía. Es la herramienta más usada en el mundo para estimar el volumen de escorrentía directa a partir de la lluvia.

Qué es el período de retorno

El período de retorno es el tiempo promedio, en años, que se espera transcurra entre dos eventos hidrológicos de igual o mayor magnitud. Es clave en el diseño de obras civiles.

Qué es el sedimento en suspensión

El sedimento en suspensión es el material sólido (arcillas, limos, arenas finas) transportado por el agua sin tocar el fondo. Reduce la vida útil de embalses, afecta la calidad del agua y es indicador del estado de una cuenca.

Qué es el tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda en llegar a la salida de una cuenca la gota de lluvia que cae en el punto más alejado. Es el parámetro clave para estimar el caudal pico de diseño.

Qué es la ecuación de Manning

La ecuación de Manning es la fórmula más usada en ingeniería hidráulica para calcular la velocidad y el caudal en canales abiertos y ríos, en función de la pendiente, la sección y la rugosidad del cauce.

Qué es la erosión hídrica

La erosión hídrica es el proceso por el cual el agua, en forma de lluvia o escorrentía, desprende y transporta partículas de suelo. Es una de las principales causas de degradación de cuencas y reducción de la vida útil de embalses.

Qué es la escorrentía superficial

La escorrentía superficial es la fracción de la lluvia que fluye sobre el terreno sin infiltrarse. Conoce sus factores y los métodos de cálculo más usados en hidrología.

Qué es la evapotranspiración

La evapotranspiración: clave en el ciclo hidrológico.

Qué es la hidrología superficial

La hidrología superficial estudia el agua en la superficie terrestre.

Qué es la humedad del suelo

La humedad del suelo es la cantidad de agua almacenada en los poros del suelo, entre la superficie y la zona saturada. Controla la escorrentía, la infiltración, el crecimiento vegetal y el pronóstico de crecidas.

Qué es la infiltración

La infiltración es el proceso por el que el agua penetra en el suelo. Determina cuánta lluvia se convierte en escorrentía y cuánta recarga los acuíferos. Conoce sus modelos y factores.

Qué es la lluvia de diseño

La lluvia de diseño es la precipitación hipotética adoptada para diseñar una obra hidráulica. Se obtiene combinando un período de retorno, una duración y las curvas IDF del lugar.

Qué es la permeabilidad del suelo

La permeabilidad es la capacidad de un suelo o roca para permitir el paso de fluidos a través de sus poros. Es fundamental para entender el movimiento del agua subterránea, la infiltración y el drenaje.

Qué es la precipitación

La precipitación es la principal entrada del ciclo hidrológico. Conoce sus tipos, cómo se mide y los parámetros clave para el diseño hidráulico.

Qué es un canal de riego

Los canales de riego: función y aplicaciones agronómicas.

Qué es un hidrograma

Un hidrograma es la representación gráfica de cómo varía el caudal de un río o canal a lo largo del tiempo, especialmente en respuesta a una lluvia.

Qué es una cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica es la unidad básica de la hidrología. Aprende qué es, cómo se delimita y cuáles son sus parámetros morfométricos fundamentales.

Qué es una inundación

Una inundación es el desbordamiento temporal del agua sobre terrenos normalmente secos. Es el desastre natural más frecuente del mundo y la principal motivación del diseño hidrológico de obras civiles.

Qué es una laguna costera

Las lagunas costeras: definición y características clave.