

El Ciclo Hidrológico

Historia

Concepto

Fases del Ciclo

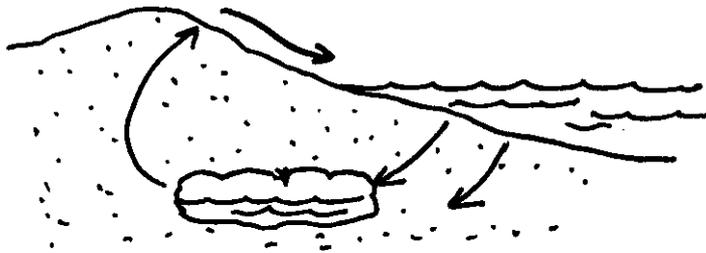
Salidas del agua subterránea

Balance Hídrico en una Cuenca

Recursos, reservas y sobreexplotación

Historia

La idea del Ciclo Hidrológico, que hoy nos parece tan intuitiva, durante siglos no fue comprendida por filósofos y “científicos”, creyendo que el ciclo se realizaba al revés: el agua penetraba en la corteza desde el fondo de los océanos, se almacenaba en la profundidad, probablemente en grandes cavernas, y ascendía después por el calor de la Tierra hasta las



partes altas de las montañas, surgiendo en las zonas de nacimiento de los ríos. No creían posible que el caudal de un gran río fuera producido exclusivamente por las lluvias y les maravillaba la existencia de manantiales en lugares topográficamente elevados y con

caudales relativamente constantes. Tales, Platón, Aristóteles,... hasta Kepler (1571-1630) y Descartes (“Principios de la Filosofía”, 1644) no se limitaban con esbozar la idea del Ciclo al revés, sino que dedicaban largos textos a promenorizar las diversas etapas del proceso. Lo más complicado era la pérdida de la sal marina, pero para ello invocaban procesos similares a la destilación.

También hubo excepciones, como el arquitecto romano Vitrubio o Leonardo da Vinci que hablaron del ciclo tal como es.

La Hidrología moderna nace con las experiencias de Perrault, Mariotte y Halley. Fueron los primeros hidrólogos empíricos que basaron sus ideas en medidas y no en la especulación.

En 1674 Pierre Perrault publica “De l’origine des fontaines”. Había medido las precipitaciones de la cuenca alta del Sena y los aforos del río, concluyendo que el volumen de las precipitaciones era seis veces superior a las aportaciones del río. Mariotte, contemporáneo de Perrault, repitió estos experimentos en un punto distinto de la cuenca del Sena, estudiando además la infiltración profunda del agua, y comprobando que el caudal de ciertos manantiales variaba de acuerdo con la oscilación de las precipitaciones.

Faltaba por cuantificar la otra mitad del Ciclo: cómo era posible que del cielo cayera tanta agua. El astrónomo Halley se interesó por el fenómeno de la evaporación porque se empañaban las lentes de sus telescopios. Realizó medidas y cálculos concluyendo que el volumen de agua evaporado un día de verano del Mediterráneo era superior al volumen de agua que recibe de todos los ríos que llegan él.

Se denomina Ciclo Hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea.

De esta definición tan simple debemos remarcar dos aspectos importantes:

1) La escorrentía subterránea es mucho más lenta que la superficial. La lentitud (a veces inmovilidad) de la escorrentía subterránea confiere al ciclo algunas características fundamentales, como que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de las últimas precipitaciones.

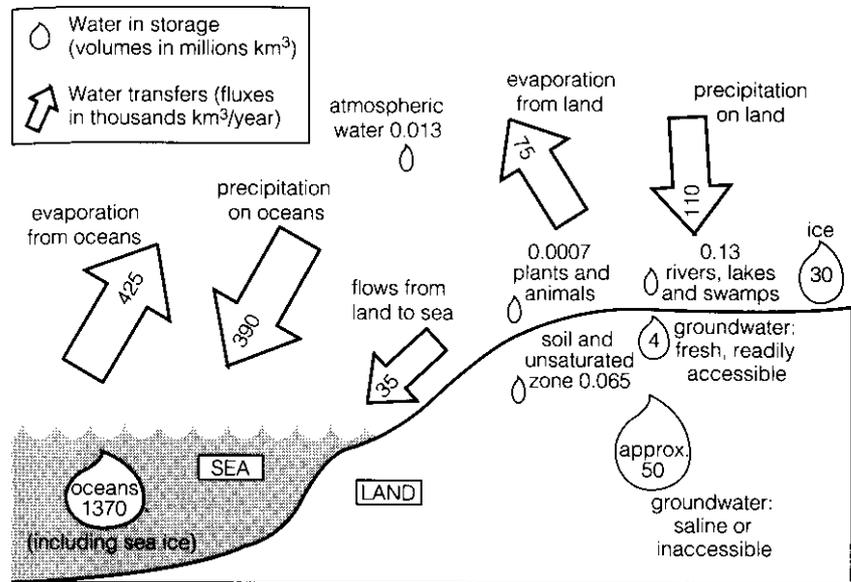


Figure 3.2 A budget for the world's water.

Price, M. (1996) pág 15

2) Las aguas subterráneas no son más que una de las fases o etapas del ciclo del agua, no tienen ningún misterioso origen magmático o profundo. A veces se olvida esta obviedad y se explotan las aguas de una región como si nada tuvieran que ver con las precipitaciones o la escorrentía superficial, con resultados indeseables.

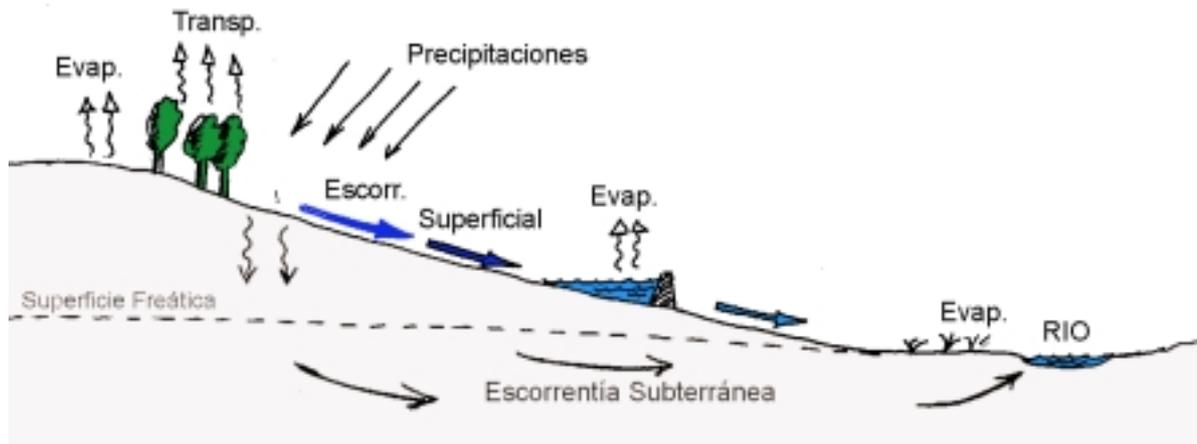
Una excepción: Existen efectivamente surgencias de aguas que proceden del interior de la Tierra y nunca han estado en la superficie ni formado parte del Ciclo Hidrológico. Pueden denominarse *aguas juveniles* y se trata de casos verdaderamente excepcionales. Las aguas termales, sulfuradas, etc. de los balnearios se demuestra mediante estudios isotópicos que son aguas meteóricas en la mayoría de los casos.

Las *aguas fósiles* o *congénitas* son aquellas que quedaron atrapadas en la formación de un sedimento.

Otras aguas subterráneas que parecen ajenas al ciclo son las que aparecen en regiones desérticas. Son aguas que se infiltraron hace decenas de miles de años cuando esas mismas zonas desérticas no eran tales. Tanto estas como las aguas fósiles pertenecen al Ciclo Hidrológico, pero han estado apartadas de él durante un periodo muy prolongado.

Fases del Ciclo

Como se trata de un ciclo podríamos considerar todas sus fases comenzando desde cualquier punto, pero lo más intuitivo puede ser comenzar en la Precipitación y considerar qué caminos puede seguir el agua que cae sobre los continentes en las precipitaciones:



- a) **Evaporación.** Una parte se evapora desde la superficie del suelo (“charcos”) o si ha quedado retenida sobre las hojas de los árboles. A este último fenómeno se le denomina “**intercepción**”, y en lluvias de corta duración sobre zonas de bosque puede devolver a la atmósfera una gran parte del agua precipitada sin haber tocado el suelo.
- b) **Infiltración.** El agua infiltrada puede, a su vez, seguir estos caminos:
 - b1) **Evaporación.** Se evapora desde el suelo húmedo, sin relación con la posible vegetación.
 - b2) **Transpiración.** Las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada en el suelo, una pequeña parte es retenida para su crecimiento y la mayor parte es transpirada.

La suma de b1) y b2) se estudia conjuntamente: es la **evapotranspiración**
 - b3) **Escorrentía subsuperficial o hipodérmica**, (“interflow”), que tras un corto recorrido lateral antes de llegar a la superficie freática acaba saliendo a la superficie
 - b4) Si no es evaporada ni atrapada por las raíces, la gravedad continuará llevándola hacia abajo, hasta la superficie freática; allí aún puede ser atrapada por las raíces de las plantas “freatofitas” (chopos, álamos,...), de raíces muy profundas, y que a diferencia de otras plantas, buscan el agua del medio saturado.
 - b5) Finalmente, el agua restante da lugar a la **escorrentía subterránea**.
- c) **Escorrentía superficial.** El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, escurre superficialmente. Aún le pueden suceder varias cosas:

- c1) Parte es evaporada: desde la superficie de ríos, lagos y embalses también se evapora una pequeña parte¹
- c2) Otra parte puede quedar retenida como nieve o hielo o en lagos o embalses. (“Escorrentía superficial diferida”)
- c3) Finalmente una parte importante es la escorrentía superficial rápida que sigue su camino hacia el mar.

En resumen, hemos visto que el agua precipitada puede:

- sufrir Evaporación y Evapotranspiración (a, b1, b2, b4, c1)
- escurrir superficialmente
- constituir escorrentía subterránea

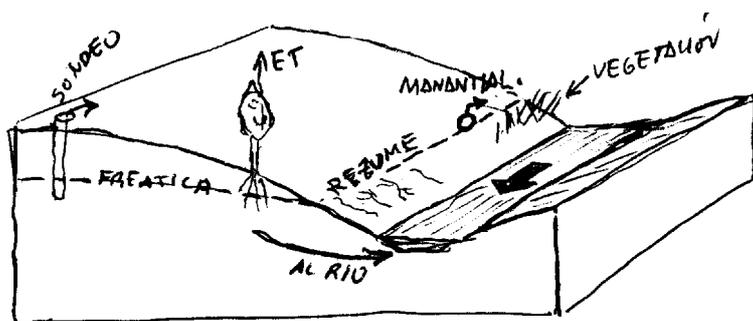
Otros términos importantes son:

Escorrentía Directa, la que llega a los cauces superficiales en un periodo de tiempo corto tras la precipitación, y que normalmente engloba la escorrentía superficial (c3) y la subsuperficial (b3). Son imposibles de distinguir: una gran parte de lo que parece escorrentía superficial (por el aumento de los caudales que sigue a las precipitaciones) ha estado infiltrada subsuperficialmente

Escorrentía Básica, la que alimenta los cauces superficiales en los estiajes, durante los periodos sin precipitaciones, concepto que engloba la Escorrentía Subterránea (b5) y la superficial diferida (c2)

Salidas del agua subterránea

Ya hemos visto cómo continúan su camino el agua evaporada y la escurrida superficialmente. Para continuar con la visión del ciclo, nos queda sólo reseñar cómo lo hace el agua subterránea, la escorrentía subterránea.



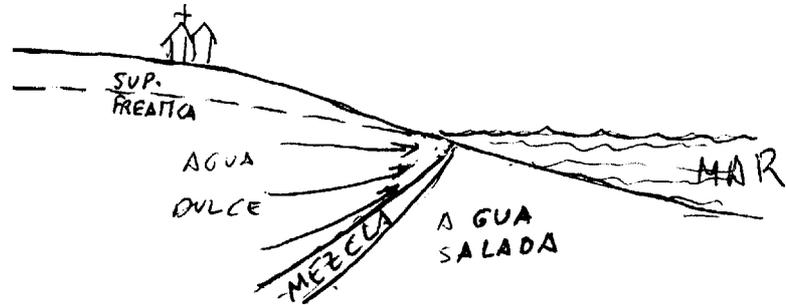
El agua que ha llegado a la zona saturada circulará por el acuífero siguiendo los gradientes hidráulicos regionales. Hasta que sale al exterior o es extraída su recorrido puede ser de unos metros o de bastantes kilómetros, durante un periodo de unos meses o de

miles de años. Esta salida al exterior puede ser por los siguientes caminos:

- Ser extraído artificialmente, mediante **pozos o sondeos**. En zonas de topografía plana y superficie freática profunda, la extracción por captaciones constituye casi la única salida del agua subterránea.
- Salir al exterior como **manantial**. Los contextos hidrogeológicos que dan lugar a un manantial son variados, en figura adjunta se esquematiza sólo uno de ellos

¹ Proporcionalmente pequeña, si consideramos el total de una gran cuenca, pero puede ser muy importante en lugares áridos que se abastecen con un embalse

- **Evapotranspiración**, por plantas freatofitas o si la superficie freática está próxima a la superficie. En laderas que cortan la superficie freática se genera una abundante vegetación
- **Alimentar un cauce** subrepticamente. Es normal que un río aumente paulatinamente su caudal aguas abajo aunque no reciba afluentes superficiales.
- En zonas costeras: Afluye subterráneamente **al mar**. Esta pérdida es necesaria para mantener estable la "interfase" agua dulce – agua salada.



De todas ellas, exceptuando las áreas costeras, la más importante es la salida hacia los cauces. En una región donde pudiéramos suponer el subsuelo homogéneo el flujo sería así:

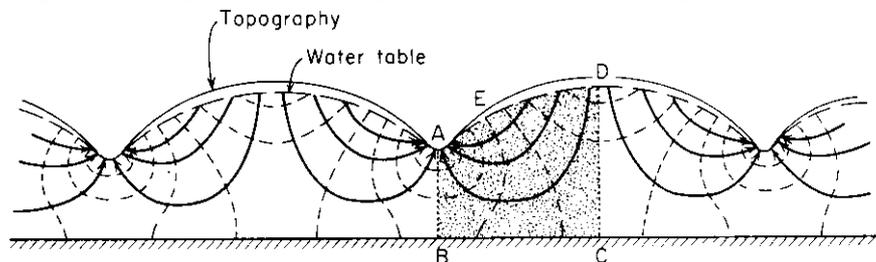


Figure 6.1 Groundwater flow net in a two-dimensional vertical cross section through a homogeneous, isotropic system bounded on the bottom by an impermeable boundary (after Hubbert, 1940).

(Freeze & Cherry, 1979, p.193)

Esta afluencia de agua subterránea a los ríos no se produce siempre, en ocasiones es al contrario. Se denominan ríos **efluentes** e **influentes** respectivamente.

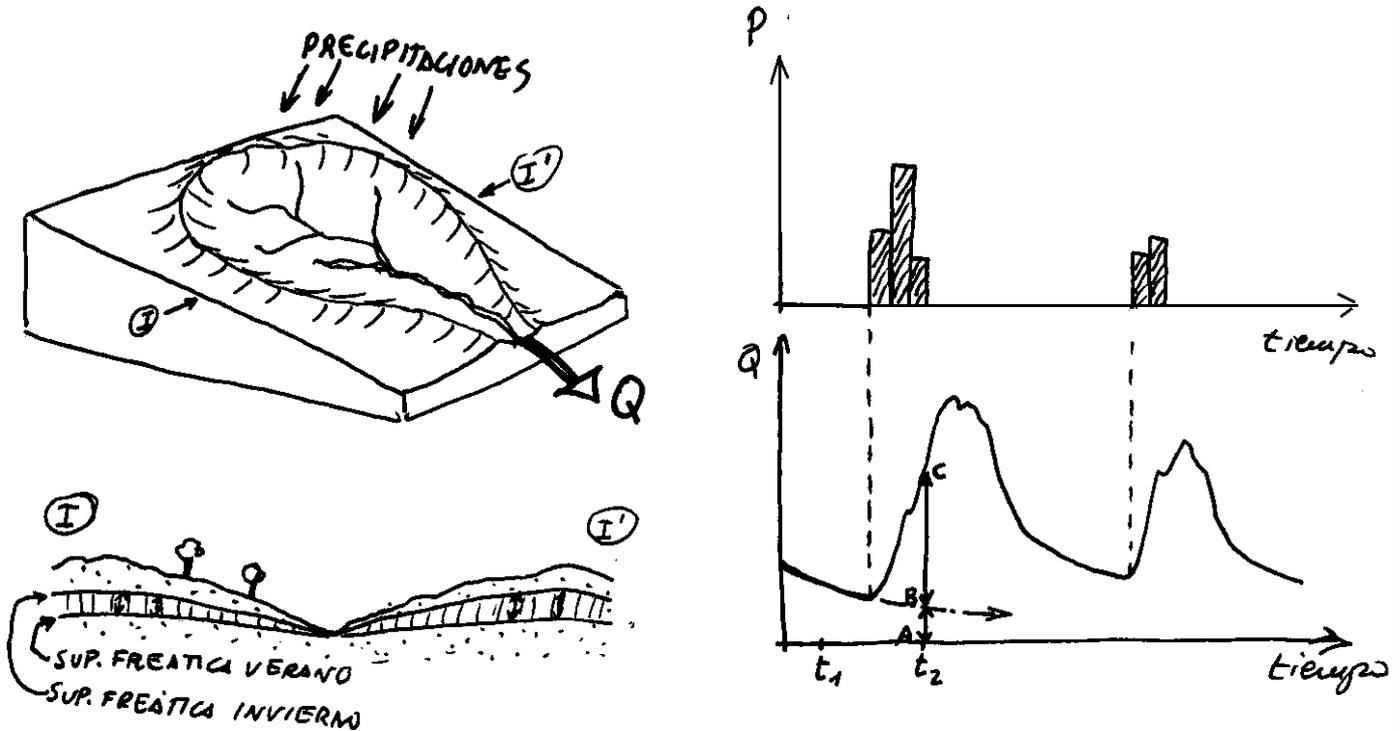
Balance Hídrico en una Cuenca

Cuenca Hidrográfica es la definida por la topografía, fácilmente delimitable sobre un mapa topográfico. **Cuenca hidrogeológica** es un concepto que engloba también a las aguas subterráneas. Una cuenca hidrográfica constituirá también una cuenca hidrogeológica cuando no existan trasvases apreciables de aguas subterráneas de una cuenca a otra, es decir, que podamos considerar que las divisorias topográficas que dividen a la escorrentía superficial constituyen también divisorias de la escorrentía subterránea entre cuencas adyacentes. Esto se cumple en general para cuencas grandes de más de 1000 o 2000 km². Para cuencas pequeñas habría que considerar la hidrogeología de la zona con cuidado

Cuando hace tiempo que no se producen precipitaciones, un río puede continuar llevando agua por las siguientes razones:

- Nieve o hielo que se están fundiendo
- Almacenamiento superficial: lagos, embalses
- Almacenamiento subterráneo: Acuíferos

Para simplificar, pensemos en una cuenca sin las dos primeras causas, representada en el esquema adjunto. Antes de producirse las precipitaciones, el caudal se iba agotando paulatinamente hasta que, en el mismo instante que comienza la precipitación, el caudal comienza a aumentar. En el instante t_1 todo el caudal era debido a escorrentía básica (en este caso, escorrentía subterránea). En el instante t_2 , parte del caudal Q (el segmento AB) será debido a la escorrentía básica, y otra parte (BC) será debida a la escorrentía directa



Con las mismas precipitaciones, el hidrograma resultante será distinto según se trate de una cuenca permeable con importantes acuíferos, o de una cuenca impermeable, sin acuíferos.

Vemos, por tanto, que el conjunto de acuíferos de una cuenca se comportan realmente como un “embalse subterráneo”, ya que guardan el agua cuando hay exceso y la sueltan lentamente cuando no hay precipitaciones.

Por tanto, si consideramos una cuenca hidrogeológicamente cerrada, y un periodo de varios años, *el volumen total de Precipitaciones no evapotranspiradas ha de ser igual a la aportación* (volumen aportado) *del río en la desembocadura durante ese mismo periodo.* Efectivamente, para un periodo largo estamos integrando la escorrentía superficial y la subterránea que alimentó al cauce en los periodos de estiaje.

Para un **año hidrológico** (1 Sep-31 Ago) el **balance hídrico** sería:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \Delta \text{ almacenamiento}$$

$$\text{Precip (+ Agua de otras cuencas)} = \text{ET} + \text{Esc. Sup} + \text{Esc Subt (+ Agua a otras cuencas)} \pm \Delta \text{ almac.}$$

Si es una cuenca cerrada:

$$\text{Precip} = \text{ET} + \text{Esc. Sup} + \text{Esc Subt} \pm \Delta \text{ almac.}$$

Y si, además es para un periodo de más de 20 años:

$$\text{Precip} = \text{ET} + \text{Esc. Sup} + \text{Esc Subt}$$

Parece muy simple pero para conocer el funcionamiento de una cuenca como unidad hidrogeológica es necesario cuantificar su balance hídrico. Como término medio, para todas las cuencas españolas, la última ecuación presenta aproximadamente estos valores:

$$670 \text{ mm.} = 480 \text{ mm.} + 130 \text{ mm.} + 60 \text{ mm.}$$

$$100 \% = 72\% + 19\% + 9\%$$

También se establece el **balance hídrico de un acuífero** concreto o de un “*sistema acuífero*” (=conjunto de acuíferos que se consideran conjuntamente). La ecuación general (Entradas = Salidas \pm Δ almacenamiento) es la misma que para la cuenca como unidad, pero en un acuífero hay que considerar entradas y salidas desde y hacia otros acuíferos, infiltración o recarga artificial, bombeo, salida hacia los cauces o el mar, etc.

Recursos, reservas y sobreexplotación

Si explotamos el agua que se puede renovar (considerando un periodo de unos años) se dice que explotamos los **recursos**. Si utilizamos más agua de la que puede renovarse, se dice que estamos explotando las **reservas**, y estamos produciendo **sobreexplotación**. Los niveles del agua en los pozos cada año se encuentran más bajos.