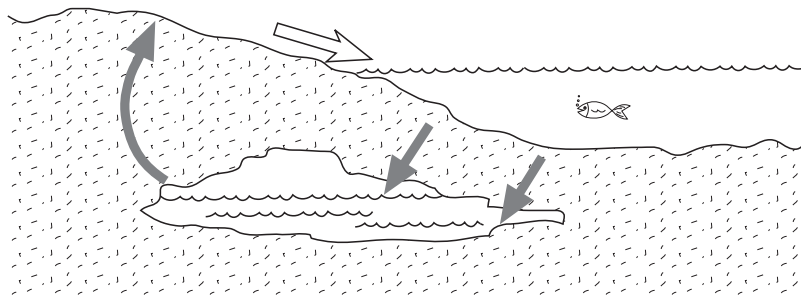


El Ciclo Hidrológico

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 pormenorizar las diversas etapas del proceso. Lo más complicado era explicar 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 (1656 - 1742) 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 él¹.

El comienzo de la Hidrología subterránea como ciencia es mucho más moderno. La primera ecuación que explica el flujo a través de un medio poroso (Ley de Darcy) data de 1857, y la ecuación fundamental que cuantifica el comportamiento de las aguas subterráneas ante los bombeos es de 1935 (Theis). La relación entre las formaciones geológicas y las aguas subterráneas no

¹ Este es un balance verdaderamente impreciso, hay que considerar las entradas desde el Atlántico. Al menos dejó constancia de que el volumen de agua evaporada de los mares era suficiente para explicar las lluvias.

adquirió cierta madurez hasta principios del siglo XX (hay que destacar a Meizner², del Servicio Geológico norteamericano).

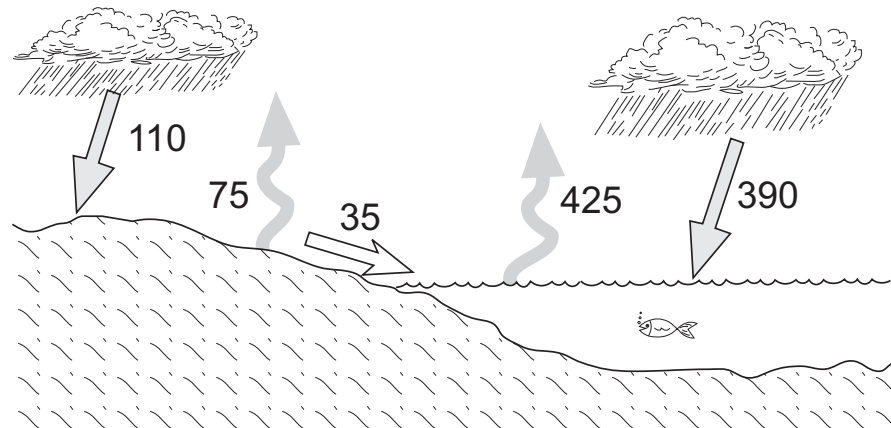
Concepto

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.

Sobre esta definición tan simple podemos realizar algunas observaciones:

1) No es tan simple como “El agua se evapora en el océano y precipita sobre los continentes”. Vemos en la figura adjunta que en ambos medios se produce evaporación y precipitación, aunque es cierto que la evaporación

predomina en el océano y la precipitación en los continentes



Cuantificación del ciclo hidrológico a escala mundial (volúmenes en km³/año, cifras de Price, 2003)

2) 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.

3) 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.

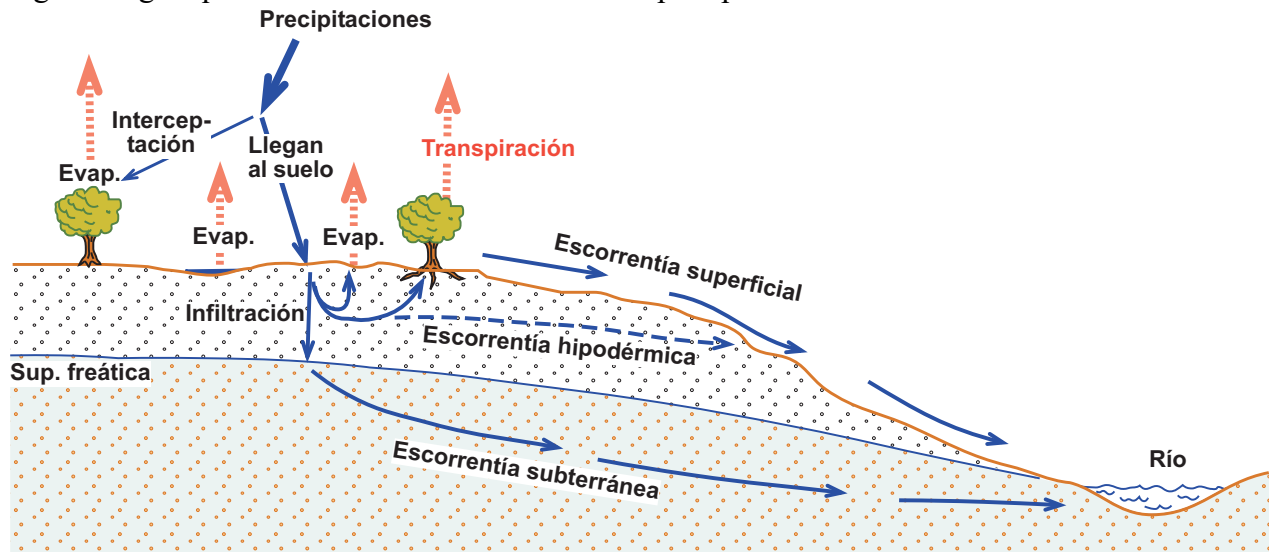
Una excepción: Existen efectivamente surgencias de aguas que proceden del interior de la Tierra y nunca han estado en la superficie ni formado parte del Ciclo Hidrológico. Pueden denominarse *aguas juveniles* y se trata de casos verdaderamente excepcionales. Las aguas termales, sulfuradas, etc. de los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

² Meinzer, O.E. (1923).- “The occurrence of ground water in the United States with a discussion of principles” U. S. Geological Survey Water Supply Paper 489, 321 pp.

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.³
- 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:

³ En zonas de bosque se ha medido que la intercepción habitualmente varía del 20 al 30%. En cuencas en las que ha aumentado la superficie de bosque, se aprecia claramente una disminución en la escorrentía (Martínez, J., 2006 en <http://www.unizar.es/fnca/duero/docu/c11.pdf>)

- c1) Parte es evaporada: desde la superficie de ríos, lagos y embalses también se evapora una pequeña parte⁴
- 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 conceptos fundamentales 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

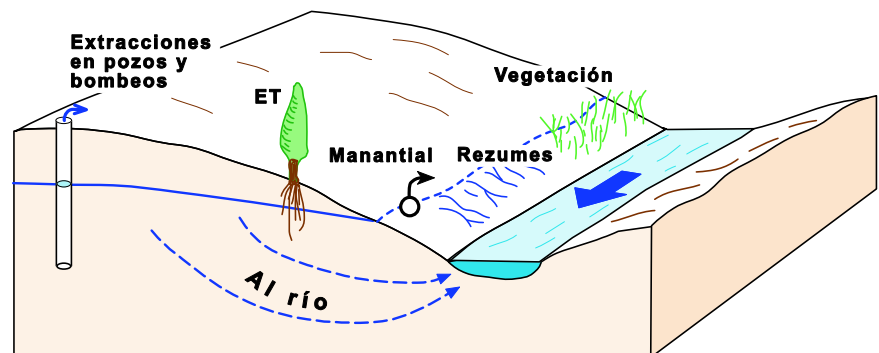
Escorrentía Básica, la que alimenta los cauces superficiales en los estiajes, durante los periodos sin precipitaciones, concepto que engloba la Escorrentía Subterránea (b5) y la superficial diferida (c2)

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 extraída 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.
- **Evapotranspiración**, por plantas *freatofitas*⁵ o si la superficie freática está próxima a la superficie. En laderas que cortan la superficie freática se

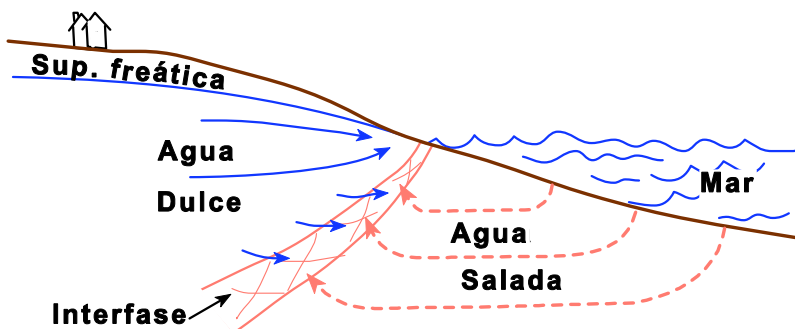


⁴ Proporcionalmente pequeña, si consideramos el total de una gran cuenca, pero puede ser muy importante en lugares áridos que se abastecen con un embalse

⁵ La mayoría de las plantas deben absorber agua por sus raíces del suelo húmedo pero no saturado. Las denominadas *freatofitas* lo hacen de la zona saturada; suelen ser plantas de largas raíces que se encuentran en las proximidades de los ríos, como los álamos.

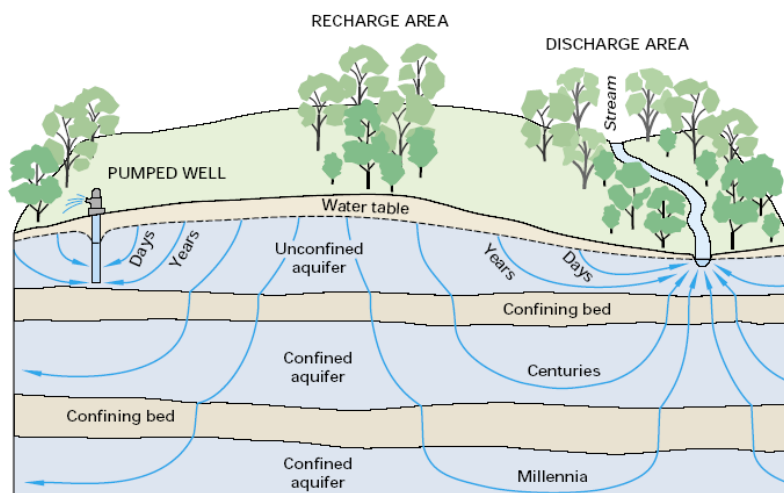
genera una abundante vegetación.

- **Alimentar un cauce** subrepticamente. Es normal que un río aumente paulatinamente su caudal aguas abajo aunque no reciba afluentes superficiales.



- **Afluencia al mar** en zonas costeras. Se genera una zona de mezcla (*interfase*) en la que se alcanza un equilibrio entre el agua continental y el agua procedente del océano, mezclándose y ascendiendo hacia la costa para perderse en el mar. Para que se alcance este equilibrio es necesario que la superficie freática esté más elevada que el mar, ya que el agua continental tiene una densidad menor que el agua del mar y necesita una altura mayor para conseguir la misma presión. Esta pérdida de agua dulce hacia el mar es necesaria para evitar la intrusión de agua salada en el continente.

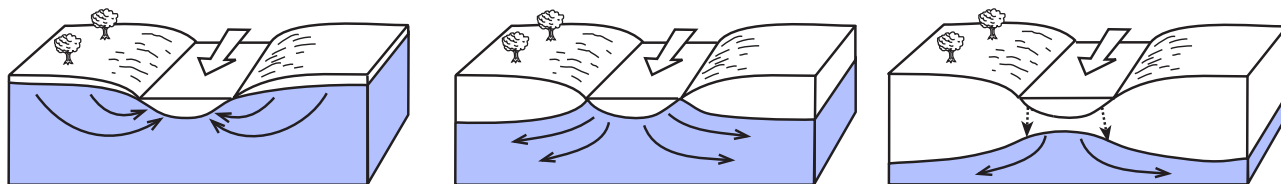
De todas ellas, y exceptuando las áreas costeras, la más importante es la salida hacia los cauces. En la figura se muestra una simplificación del flujo subterráneo en una región con alternancia entre capas permeables y otras poco permeables (en la figura: "confining bed"). Existen flujos *locales*, de días o años de recorrido, y flujos *regionales* con recorridos de duración de siglos a milenios.



Tomado de <http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1139/>

Relaciones entre aguas superficiales y subterráneas

Esta afluencia de agua subterránea a los ríos no se produce siempre, en ocasiones el flujo es del río al acuífero. Se denominan ríos **efluentes** e **influentes** respectivamente (o ganadores y perdedores).



Río efluente o ganador

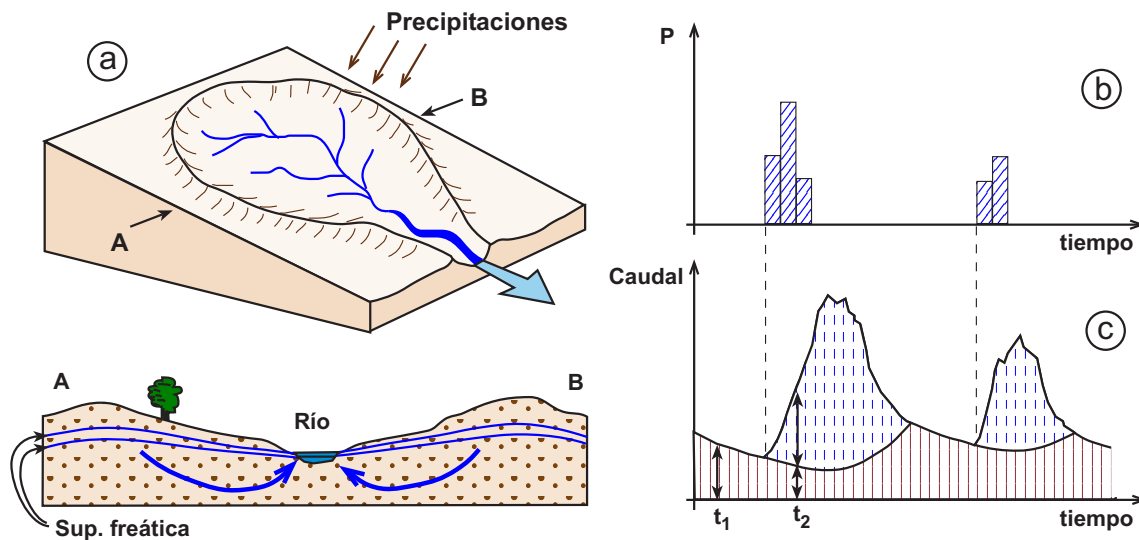
Ríos perdedores o influentes

Dibujado a partir de <http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1186>

Cuando hace tiempo que no se producen precipitaciones sobre su cuenca, un río puede continuar llevando agua por las siguientes causas:

- 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, y que está representada en la figura (a). El río se comporta como efluente (ganador), recoge el drenaje del almacenamiento subterráneo (*escorrentía subterránea*). Se muestra el gráfico de precipitaciones o *hietograma* (b) y debajo la evolución del caudal, *hidrograma* (c). Observamos que antes de producirse las precipitaciones, el caudal se iba agotando paulatinamente hasta que, al comenzar las precipitaciones, el caudal comienza a aumentar. En el instante t_1 todo el caudal es debido a *escorrentía subterránea*. En el instante t_2 , parte del caudal será debido a la *escorrentía superficial* y otra parte será debida a la *escorrentía subterránea*⁶.



En la figura (c) observamos que, transcurrido el aguacero, la aportación subterránea ha aumentado, ya que parte de la precipitación se infiltró e hizo subir la superficie freática, lo que a su vez ha provocado una mayor *escorrentía subterránea* hacia el cauce. Por tanto, que el conjunto de acuíferos de una cuenca se comportan realmente como un “embalse subterráneo”, ya que almacenan el agua cuando hay exceso y la liberan lentamente cuando no hay precipitaciones.

Balance Hídrico en una Cuenca

Cuenca Hidrográfica es la definida por la topografía, fácilmente delimitable sobre un mapa topográfico. **Cuenca hidrogeológica**⁷ 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.

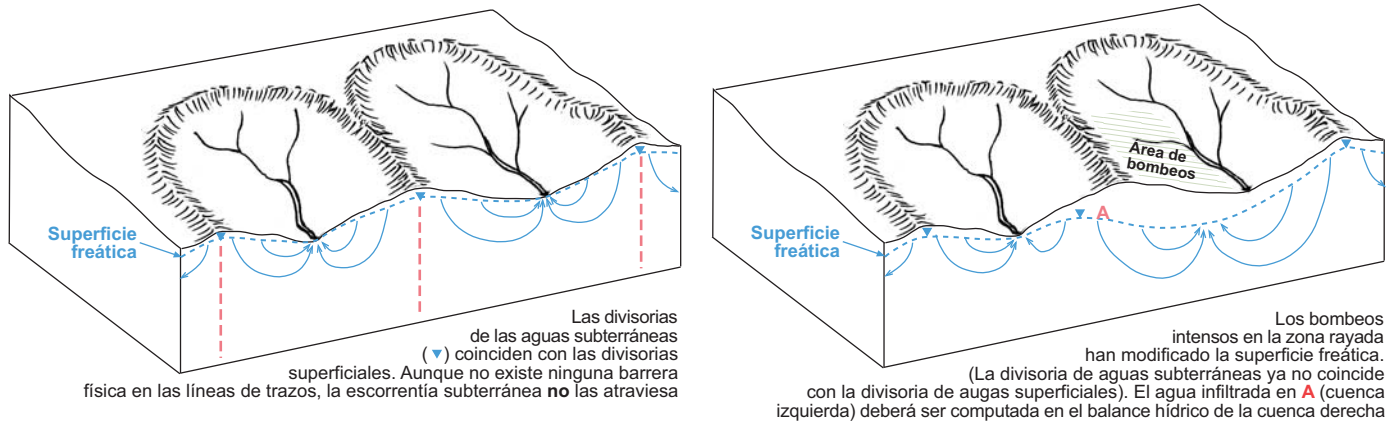
No es necesaria la presencia de fallas o estratos inclinados que provoquen el paso del agua subterránea de una cuenca a la adyacente. En la figura (pág. siguiente) observamos que eso puede producirse con un subsuelo homogéneo.

⁶ Más adelante veremos que las dos partes del hidrograma deben referirse como *escorrentía directa* y *escorrentía básica*.

⁷ También podemos decir "cuenca hidrológica" si queda claro en el contexto que nos estamos refiriendo a todas las aguas (superficiales y subterráneas).

"Cuenca hidrográfica" o "cuenca topográfica" se refiere a la *escorrentía superficial*.

En cuencas pequeñas habrá que considerar con cuidado si la cuenca superficial lo es también de las aguas subterráneas. Para cuencas grandes (de más de 1000 o 2000 km²) esto no se tiene en cuenta, y se considera la cuenca hidrográfica también como cuenca de la escorrentía subterránea.



El periodo mínimo para establecer el **balance hídrico** es el **año hidrológico** (1 Sept-31 Ago⁸); el balance en un caso general sería:

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

siendo: $\text{Entradas} = \text{Precipitación} + \text{Agua de otras cuencas}$

$\text{Salidas} = \text{ET} + \text{Escorrentía Superficial} + \text{Escorrentía Subterránea} + \text{Agua a otras cuencas}$

Si podemos considerar una **cuenca cerrada** (figura anterior, izquierda), el balance resulta:

$$\text{Precipitaciones} = \text{ET} + \text{Escorrentía Superficial} + \text{Escorr. Subterránea} \pm \Delta \text{almacenamiento}$$

El término Δ **almacenamiento** se refiere a que el volumen almacenado (acuíferos, nieve, embalses) en el momento inicial del periodo considerado puede ser diferente al volumen almacenado en el momento final. Esto siempre será así si el periodo considerado es un año hidrológico. Pero si consideramos **un periodo de muchos años** (en general se requieren más de 20 años) la ecuación del balance se simplifica así:

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

$$\text{Precip} = \text{ET} + \text{Escorrentía Total}$$

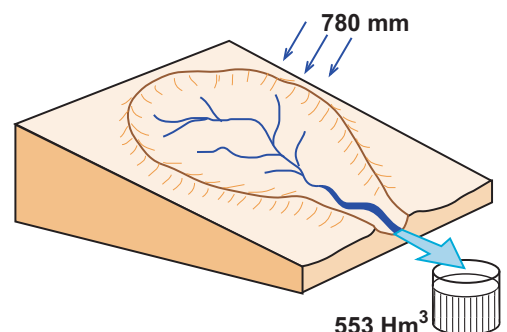
Es decir, que para un **periodo de varios años**, *el volumen total de precipitaciones no evapotranspiradas ha de ser igual a la aportación* (volumen aportado) del río en la desembocadura durante ese mismo periodo. Nótese que para un periodo largo estamos englobando la escorrentía superficial y la subterránea, ya que ésta es la que alimentó al cauce en los periodos de estiaje y por tanto también es medida en la desembocadura del río.

Ejemplo.- En una cuenca de 2400 km² se han registrado los siguientes valores para un periodo de 30 años: Precipitación media anual = 780 mm, Aportación media anual = 553 Hm³. Establecer el balance hídrico, evaluar la evapotranspiración.

Solución:

El valor de la aportación incluye la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea (ver la figura 8c., el caudal del río se compone de ambas).

Si repartiéramos uniformemente el volumen recogido de 553 Hm³ sobre la superficie de 2400 km², se generaría una lámina de agua cuya altura sería:



⁸ A veces se considera del 1 Octubre al 30 de Septiembre, aunque es más lógico desde Septiembre, puesto que en este mes comienzan las precipitaciones. Lógicamente esto varía en otras zonas del mundo.

$$\text{Altura lámina (mm)} = \frac{\text{volumen}}{\text{base}} = \frac{553 \cdot 10^6 \text{ m}^3}{2400 \cdot 10^6 \text{ m}^2} = 0,23 \text{ m} = 230 \text{ mm}$$

Por tanto, de la precipitación de 780 mm se habrían evapotranspirado: 780-230=550 mm

Este cálculo es correcto solamente porque los datos se refieren a la media de muchos años y porque la superficie de la cuenca nos permite suponer que las transferencias con otras cuencas son despreciables (se considera así por encima de 1000 km²).

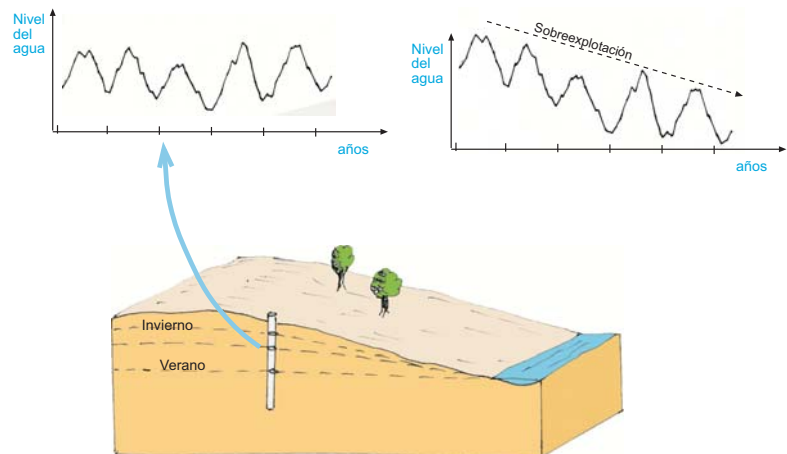
Para conocer el funcionamiento de una cuenca como unidad hidrogeológica es necesario cuantificar su balance hídrico. Como término medio, para todas las cuencas españolas, el resumen del balance hídrico presenta aproximadamente estos valores⁹:

$$\begin{array}{rclclcl} \text{Precip} & = & \text{ET} & + & \text{Escorrentía Sup.} & + & \text{Escorrentía Subt.} \\ 686 \text{ mm.} & = & 466 \text{ mm.} & + & 163 \text{ mm.} & + & 57 \text{ mm.} \\ 100 \% & = & 68\% & + & 24\% & + & 8\% \end{array}$$

También puede estudiarse el **balance hídrico de un acuífero** concreto o de un “*sistema acuífero*” (=conjunto de acuíferos que se consideran conjuntamente). La ecuación general (Entradas = Salidas ± 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.



Mantener inalterado el balance hídrico de una región mantiene los ecosistemas en su estado natural, pero no corresponde a la máxima explotación de los recursos hídricos sin llegar a sobreexplotación.

La evaluación de los recursos hídricos de una zona en base al balance hídrico “natural” (previo a la explotación) ha sido denominado el *mito del balance hídrico* (*Water Budget Myth*, Alley et al., 1999, pág. 15).

Una cierta sobreexplotación inicial puede provocar un equilibrio distinto, pero que da lugar a un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos, disminuyendo la ET, incrementando la infiltración, y provocando la alimentación de los acuíferos a partir de los cauces superficiales.

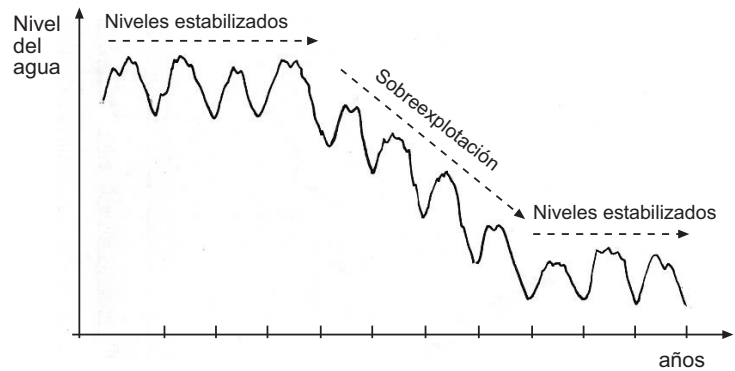
Si se logra estabilizar el nuevo nivel de explotación, la evolución de los niveles en un piezómetro sería como se indica en la figura de la página siguiente.

Se habría conseguido una explotación sostenible, aunque el precio que se ha debido pagar por ello ha sido la desaparición de vegetación y zonas húmedas y la disminución del caudal del río. Si ese

⁹ Estrela, T. et al. (1999).- La evaluación de los recursos hídricos en el Libro blanco del agua en España. *Ingeniería del agua*, 6.2: 125-138

precio es aceptable o no para los beneficios obtenidos, es una decisión en la que intervienen factores no científicos.

Si se bombea un volumen aún mayor, lo único que se conseguiría es que la superficie freática estuviera cada año más abajo y que el bombeo fuera más costoso, y, al final, inviable.



Bibliografía: Textos fundamentales

Hidrología Superficial

- Aparicio, F.J. (1997).- *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa, 303 pp.
- Chow, V.T.; D.R. Maidment & L.W. Mays (1993).- *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill, 580 pp.
- Hornberger, G. (1998).- *Elements of Physical Hydrology*. Johns Hopkins Universtiy Press
- Singh, V.P (1992).- *Elementary Hydrology*. Prentice Hall, 973 pp.
- Viessman, W. & G. L. Lewis (2003).- *Introduction to Hydrology*. Pearson Education, 5ª ed., 612 pp.
- Wanielista, M. (1997).- *Hydrology and Water Quality Control* 2ª edición. Ed. Wiley
- Ward, A.D. & S.W. Trimble (2004).- *Environmental Hydrology*. CRC Lewis, 2ª ed., 475 pp.

Hidrología Subterránea

- Custodio, E. y M. R. Llamas (Eds.) (1983) .- *Hidrología Subterránea*. (2 tomos). Omega, 2350 pp.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. (1998).- *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley, 502 pp.
- Fetter, C. W. (2001).- *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall, 4ª ed., 598 pp.
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979).- *Groundwater*. Prentice-Hall, 604 pp.
- Hiscock, H. (2005).- *Hydrogeology. Principles and practice*. Blackwell, 389 pp.
- Price, M.(2003).- *Agua Subterránea*. Limusa, 341 pp.
- Schwartz, F. W. & H. Zhang (2003).- *Fundamentals of Groundwater*. Wiley, 592 pp.
- Watson, I. & Burnett (1995).- *Hydrology. An environmental approach*. CRC Lewis, 702 pp.

En Internet

- Alley, W. M. et al.(1995).- *Sustainability of Ground-Water Resources* (86 pp. 19 Mb)
<http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1186/>
- Ralph C. Heath, R.C. (1983) *Basic Ground-water Hydrology*, (88 p., 10 Mb)
<http://water.usgs.gov/pubs/wsp/wsp2220/>
- Winter, T.C. et al..- *Ground Water and Surface Water A Single Resource* (87 pp. 12 Mb)
<http://water.usgs.gov/pubs/circ/circ1139/>