

L'AGUA SOTERRAÑO

*una ayalga
escondida
nes peñes*

«¿Qué sabe'l pexe del agua onde nada tola so vida?»

Albert Einstein

Por **Beatriz González Fernández**
& **Eduardo Menéndez Casares**
Departamentu Esplotación y Prospección de Mines
Universidá d'Uviéu

El Güeyu Deva, en Xixón, ye un bon exemplu
de surdencia o fonte.

L'AGUA NA NATURALEZA A LO LLARGO DE LA HISTORIA

Los seres humanos, por esa necesidad que siempre tuvieron de hacerse entruques y d'acceder a la conocencia, buscaron esplicación al surdir del agua pelas fontes que dan llugar a la nacencia de los ríos; esa extraordinaria manifestación que tien la Tierra d'espulsar dende les sos coraes el llíquidu esencial pa la vida llamó l'atención de los humanos dende'l principiu de los tiempos y a lo llargo d'ello foron dándose esplicaciones más o menos inxenioses, baaes cuasi siempre na observación de la realidá cercana onde se vivía, concibiendo teoríes que perduraron a lo llargo de milenios.

L'agua que brota de lo fondero la tierra siempre tuvo venceyao a creyencies y cosmovisiones relixoses que presenten la tierra y l'agua como una Gran Madre de la que s'anicia la vida animal y vexetal; un símbolu astrautu de la diosa ye'l «güeyu» o los «güeyos», el güeyu únicu como idiograma de la divinidad o'l güeyu d'agua de la fonte, señal de la vida mesma en cuantes simboliza la fertilidá de la vida (Fernández X.R., 1998).

El conceutu de ciclu hidrolóxicu, que güei nos paez tan obviu, nun foi sicasi, comprendíu polos pueblos antiguos, según atestigüen los sos escritos (Martínez Gil, J., 1972). Dende los tiempos más remotos de la historia hasta los tiempos más de recién del sieglu XVIII, l'orixe del agua de les fontes qu'alimenten a los ríos constituyó un enigmáticu problema oxetu de numberoses especulaciones y discutinios, siendo la entrada del agua del océanu nel continente al traviés de grandes cavidaes o cueves, pa dempués ascender hasta los montes por cuenta de marees o vientos, la teoría más almitida.

Na China, Oriente Próxim, Asia Central y tamién na India, disponíen de téuniques de cap-

tación de fontes y construcción de pozos que nun se superaren hasta metá del sieglu XIX. En Persia, hai más de 2.500 años desendolcaron un sistema de captación (*kanats*) que nos fai comentar que los constructores d'estes galeríes de filtración, que drenaben les peñes sedimentaries, teníen una conocencia intuitiva del funcionamientu de los acuíferos dende la que foron desendolcando diverses téuniques de prospeición y aprovechamientu.

En Grecia les idees hidrolóxicas tán direutamente influyíes pola xeoloxía llocal y los procesos ellí observaos. Los fenómenos cársticos, abondosos nesti país, sobre manera nes zones costeres, onde l'agua del mar entra nel continente, induxeron a pensar que ye'l mar l'elementu fornidor de ríos y fontes (Pulido Bosch, A., 2007).

D'esti mou, les idees errónees del pensamientu griegu foron arrastrándose y les más comunes a lo llargo de toa esta dómina foron, según Davis y de Wiest (1966): 1) La existencia d'una rede de grandes cueves nel interior de la Tierra. 2) Creencia de que la succión del vientu, atracción capilar, fuerca de les foles y marees yeren abondo como pa elevar contra'l continente l'agua de los océanos. 3) L'aportación de les lluvies y les nieves nun xustifica l'agua de los ríos y fontes. 4) La Tierra nun ye abondo permeable como pa permitir la filtración de gran cantidá de lluvia. Tamién se pensaba que la filtración del suelu yera abondo como pa facer perder la salinidad al agua.

Magar que los pensadores romanos introduxeron nueves nociones, por exemplu Vitruvio (s. I a. de C) llegó a relacionar la calidá del agua cola triba de peña pela que circula y consideraba al sol como motor del vaporizase que, al empar, xenera nubes que provoquen la lluvia que se filtra y da llugar a les fontes, les sos idees

dexáronse de llau prevaleciendo les d'otros filósofos más influyentes (Pulido Bosch, op.cit.).

Hasta finales del sieglu XVII aceptóse dogmáticamente la idea de que l'agua que descarguen les fontes y lo que drenen los cauces de los ríos nun podía proceder de les precipitaciones atmosfériques; de primeres, porque lo consideraron siempre cuantitativamente insuficiente y, de segundes, porque se pensaba que la superficie de la tierra yera enforma impermeable como pa permitir una filtración y percolación masiva y fonda del agua de lluvia y demás agües meteoriques.

Hasta finales del s. XVII aceptóse que l'agua de les fontes y los ríos nun podía proceder de la lluvia: cuntaben que yera cuantitativamente insuficiente y que la tierra yera enforma impermeable pa dexalo caltriar

Almitíos estos dos postulaos erróneos a lo llargo de tantos siglos, los filósofos de les edaes Antigua, Media y Moderna tuvieron que recurrir al so inxeniu ya imaxinación pa esplicar el misteriosu orixe del agua soterraño.

Ún de los trataos más influyentes (desconocíu n'Europa hasta medios del sieglu XX), del naturalista persa M. Karadi, escribióse a lo cabero del sieglu X y fala de temas relacionaos cola circulación del agua, agua confináu y llibre, superficial y utilización de freatofites na prospeición d'agua soterraño (Pulido Bosch, op.cit.).

N'Europa hai que destacar pola so claridá de pensamientu y visión adelantada, a Leonardo da Vinci (1452-1519) y, sobre manera, a Bernard Palissy (1510-1590) que ye'l primeru n'interpretar correutamente'l ciclu hidrolóxicu. Les sos teoríes al rodiu del orixe del agua soterraño, apaecen escrites en forma d'un orixinal ya interesante

diálogu ente dos personaxes: «Teoría» y «Práctica», nel que la primera defende la hipótesis tradicional de que l'orixe del agua soterraño ta nel mar mentanto que-y respunde la segunda: «*En tomando en consideranza seriamente per munchu tiempu la causa del orixe de les fontes y el llugar d'onde remanez la so agua, llegué, finalmente, a la firme convicción de qu'éstes proceden de les lluvies y nun son enxendraes por otra causa qu'ésta*». Darréu d'ello esplica, d'un mou cenciellu y precisu, que l'agua de lluvia empapa primero la superficie del suelu, darréu se filtra y percola en fondura hasta dar con una peña impermeable, sobre lo que discurre hasta atopar

un sumidoriu y, pa cabu, descarga, dando orixe a les fontes, dende les que, al traviés de los ríos, va dar al mar (Martínez Gil, op. cit.).

Les idees que Vitruvio hai mil seiscientos años, y Palissy hai cien años, espunxeren y desendolcaren confirmóles dafechu Pierre Perrault (1608-1680) per mediu de meritorios trabayos esperimentales, que plantearon de nuevo'l controvertíu tema del orixe del agua soterraño. Perrault recompiló a lo llargo de tres años consecutivos los datos de pluviosidá de la conca alta del ríu Sena y, al mesmu tiempu, fixo, periódicamente, midiciones del caudal del ríu. N'acabando esti periodu, fixo comparanza ente los valores de los caudales del ríu colos de les lluvies, observando qu'éstes foren seis vegaes superiores a aquéllos; esti cálculu permitió-y demostrar la invalidez de l'antigua teoría qu'afirmaba que l'agua de les lluvies yera cuantitativamente in-

suficiente pa xustificar les aportaciones de los ríos. Perrault espunxo los resultaos d'estes investigaciones na so obra espublizada en 1674, *De l'origine des Fontaines*.

Mariotte (1620-1684), repitió y confirmó l'eperimentu de Perrault nun puntu estremáu de la conca del Sena, y les observaciones y esperimentos de Halley (1656-1742) al rodiu del índiz d'evaporación complementaron les ideas establecies por Perrault y Mariotte, creando con ello el primer cuerpu de doctrina sobre l'orixe del agua soterraño, del so desplazamientu, del caudal de los ríos y del ciclu hidrolóxicu en xeneral (Martínez Gil, op. Cit.).

LA HIDROXEOLOXÍA ACTUAL

Tal como s'esplicó nos párrafos anteriores, la idea de que l'agua de les fontes y lo que constitúi los ríos procede de les precipitaciones que caen sobre la superficie terrestre nun s'almitiere dafechu hasta lo cabero del sieglu xvii. Esta idea ye la base de lo que se conoz como *Ciclu Hidrolóxicu* o *Ciclu del Agua* (Fig. 1), conceutu qu'esplica'l movimientu del agua, qu'asciende pola mor de la vaporización y descende por precipitación (lluvia, ñeve o xaraza) hasta la superficie de la tierra; una y bones ellí sigue'l viaxe, desplazándose sobre los calces o pel **interior de les peñes y sedimentos**. Puen estremase, polo tanto, dos etapes nel Ciclu del Agua: la superficial y la soterraña, que, obviamente tán coneutaes ente sí.

De la etapa soterraña del *Ciclu Hidrolóxicu* oúpase la Hidroxeoloxía que surde como auténtica ciencia a metá del sieglu xix cuando

diversos autores establecieron dalgunes de les principales lleis relatives al funcionamientu del agua soterraño. Ente estos autores destaquen Darcy, Boussinesq, Forcheimer, Thiem y Dupuit. A lo llargo del sieglu xx, coincidiendo col desendolque xeneral de toles ciencias, la Hidroxeoloxía algama cotes peraltes de conocencia siendo Theis y Jacob dos de los autores de mayor relevancia.

L'AGUA SOTERRAÑO: ACUÍFEROS Y FONTES

Les dos etapes del Ciclu Hidrolóxicu enantes mentaes, faen referencia a los dos grandes grupos d'agua que se puen establecer acordies col mediu que utilice pa desplazase: lo superficial y lo soterraño, y ye importante resaltar la estrecha rrellación qu'hai ente entrambes dos al igual qu'ente les diferentes etapes del Ciclu, darréu que cualquier procesu qu'afeute a una d'elles incidirá en toles demás. Esto, que paez enforma elemental, non siempre se tuvo en cuenta, llegando a esplotase l'agua soterraño d'una determinada conca como si fore independiente de les precipitaciones, llogrando con ello resultaos mui adversos. Ye'l casu, por exemplu, de la conca mediterránea española, onde la sobreesplotación de los acuíferos provocó la desaparición de dellos ríos.

De toes estes diferentes etapes peles que pue atravesar l'agua y que tán interconeutaes ente sí, les que tienen llugar sobre la superficie terrestre –l'agua superficial– ye, en xeneral, bien conocío, comprendío y abundantemente usao (acumúlase en banzaos, tresvásase, etc.). Sin embargo, l'agua que se filtra en subsuelu foi tradicionalmente la gran desconocida del Ciclu del Agua, atribuyéndu-y, dacuando, un orixe y comportamientu enigmáticos. Esto contrasta

col fechu de que l'agua soterraño constitúi, tres los casquetes polares, la mayor reserva d'agua dulce continental (alredor del 97% frente a menos del 3% del agua de los ríos y llagos).

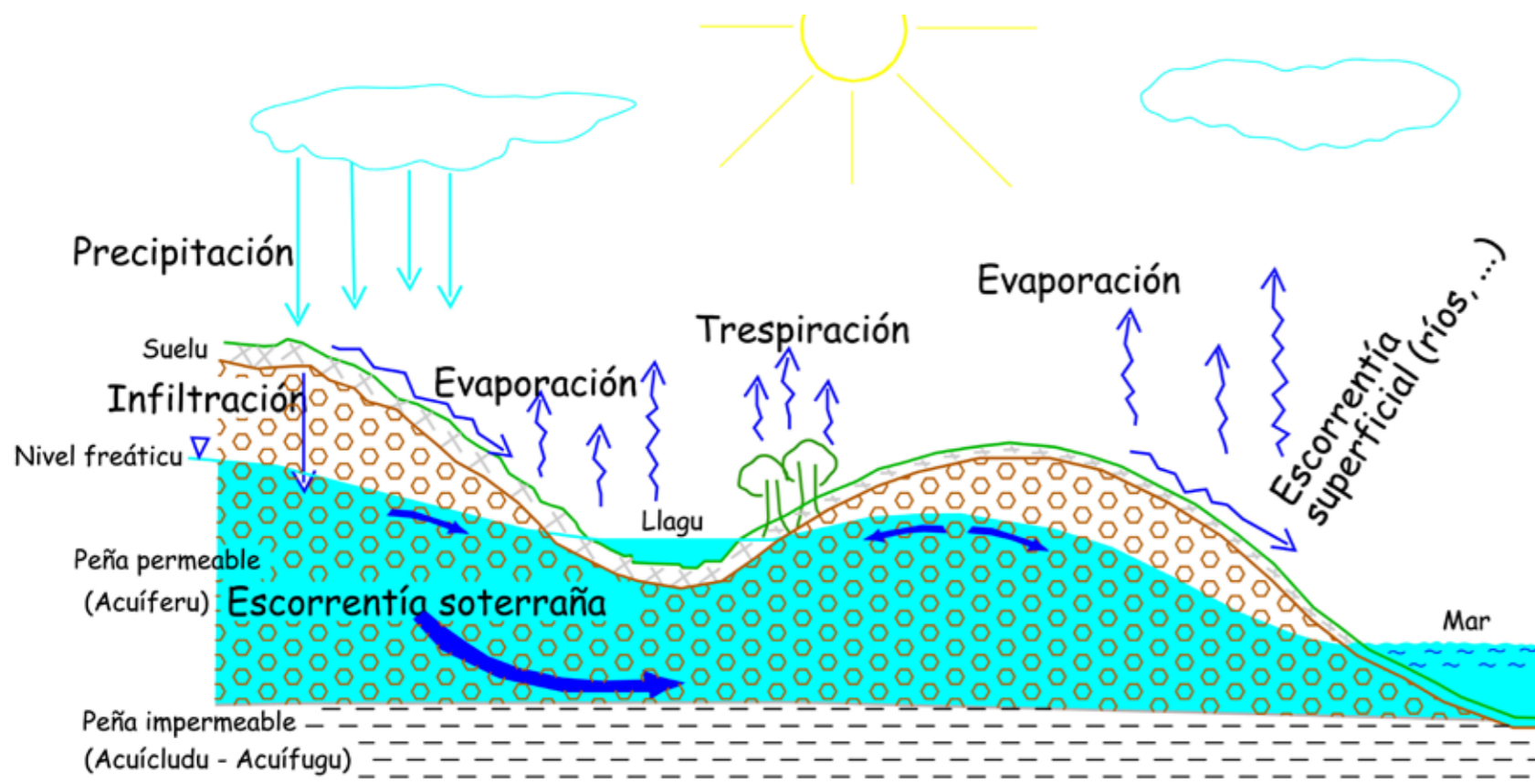
Lo soterraño ye'l 97% del agua dulce continental; lo de los ríos y llagos, ye namái que'l 3%

Como s'observa nel esquema del Ciclu Hidrolóxicu de la figura 1, del agua que cai en forma de precipitación una parte vapóriase primero de llegar al suelu y vuelve de nuevo a l'atmósfera; otro acumúlase en pocos o sobre la vexetación y dende allí pue tamién vaporizase; **otra parte filtra en subsuelu formando l'agua soterraño**, y per último, lo que nin se vaporiza nin se filtra circula sobre la superficie; dende equí, una porción pue sufrir tamién un procesu de vaporización, otra queda retenida en forma de ñeve, de xelu o en llagos y banzaos y el restu pasa a formar parte de les corrientes superficiales que s'empobinen contra la mar.

El pasu d'agua superficial a soterraño entama cola filtración, ello ye, cuando parte del agua procedente de les precipitaciones caltria en suelu y va desplazándose verticalmente hasta que s'atopa con peñes poroses y permeables, introduzse dientro de los sos poros y/o fendedures y circula pel so interior.

En función de la capacidá pa contener y pro-

ABAXO
Figura 1. Esquema del Ciclu Hidrolóxicu



porcionar agua puen estremase dos grandes grupos de peñes, les que permiten que l'agua s'acumule y circule pel so interior y aquélles que nun puen almacenar agua o, si lo faen, nun permiten qu'esto circule a través d'elles. Les primeras son peñes que dende'l puntu de vista hidroxeolóxicu se denominen *acuíferos*, mientras que les segundes son *acuicludos* y *acuífugos*.

Los acuíferos almacenen l'agua porque tienen una propiedá conocida como *porosidá*, que se define como la relación entre el volume de güecos y el volume total de peña. Pero amás de tener capacidá d'almacenamientu, los acuíferos permiten que l'agua circule al so través; esta propiedá conózse como *permeabilidad*.

Polo tanto un acuíferu ye una peña poroso y permeable na que l'agua s'almacena dentro de los güecos o poros (de forma asemeyada a una esponxa o a una bañera enllena de sable a la que se-y amiesta agua) y desplázase a través d'ello a velocidaes que van dende centímetros a centenares de metros al día. Pol contrario los *acuicludos* son peñes qu'almacenen agua, pero tienen baxa capacidá pa tresmitilo y los *acuífugos* son peñes que nin almacenen nin tresmiten agua.

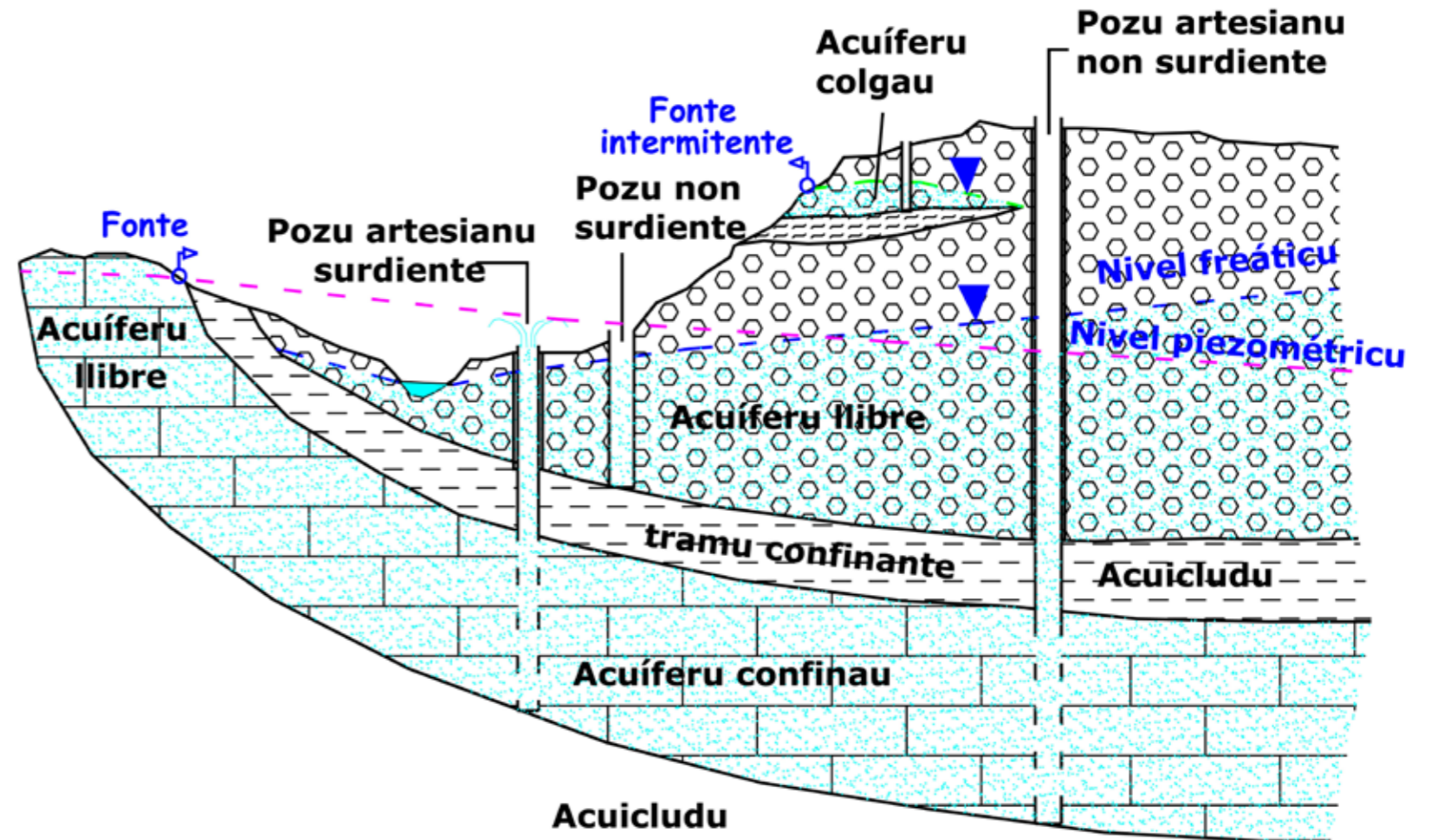
Dentro de los acuíferos l'agua algama un determináu nivel, conocíu como *nivel freáticu* nos **acuíferos llibres** (Fig. 2) que son aquellos nos qu'hai una superficie llibre d'agua en contactu col aire y, polo tanto, a la presión atmosférica, de mou que perbaxo d'esti nivel tolos güecos qu'hai dentro del acuíferu tán ocupaos por agua; esta zona de los acuíferos conózse como *zona saturada*.

Perriba del nivel freáticu alcuéntrase la *zona non saturada* (denomada tamién *zona vadosa* o *zona d'aireación*) que ye la parte del subsuelu comprendida ente la superficie del terrén y la

DERECHA
Figura 2. Corte vertical del terrén qu'amuesa les estemaes tribes d'acuíferos

zona saturada siendo la llende ente entrambes dos el nivel freáticu. Na zona non saturada los güecos tán ocupaos en parte por aire (que suel tar a presión atmosférica) y en parte por agua (a presión inferior a lo atmosférico), pero trátase d'un agua que nun circula sinón que permanez reteníu poles fuerces moleculares formando una fina película alrededor de les partícules sólides (agua pelicular, de retención o lligao) o bien queda reteníu por capilaridá (agua capilar qu'asciende venciendo la gravedá).

Arriendes de los acuíferos llibres hai otra mena d'acuíferos que son los **acuíferos confinados**, *cativos*, *presos* o a *presión*, que son aquellos nos que l'agua s'alcuentra sometío a una presión superior a lo atmosférico, pola mor de tar xebraes de l'atmósfera por peñes y/o sedimentos impermeables, y l'agua ocupa tolos güecos de la formación acuífera, saturándola; el nivel qu'algama l'agua cuando se fai un pozu nun acuíferu confináu denomáse *nivel piezométricu* que siempre s'asitia perriba del techu del acuíferu y pue llegar a algamar cotes superiores a les de la boca del pozu, falándose nesti casu de *pozu artesianu surdiente* (ver Figura 2).



Un casu intermediu ye'l de los **acuíferos semiconfinados** que s'estremen de los cativos porque los materiales confinantes nun son totalmente impermeables (acuitardos) sinón que permiten qu'heba daqué circulación d'agua per ellos; nesti casu'l nivel piezométricu tamién s'alcuentra perriba del techu del acuíferu.

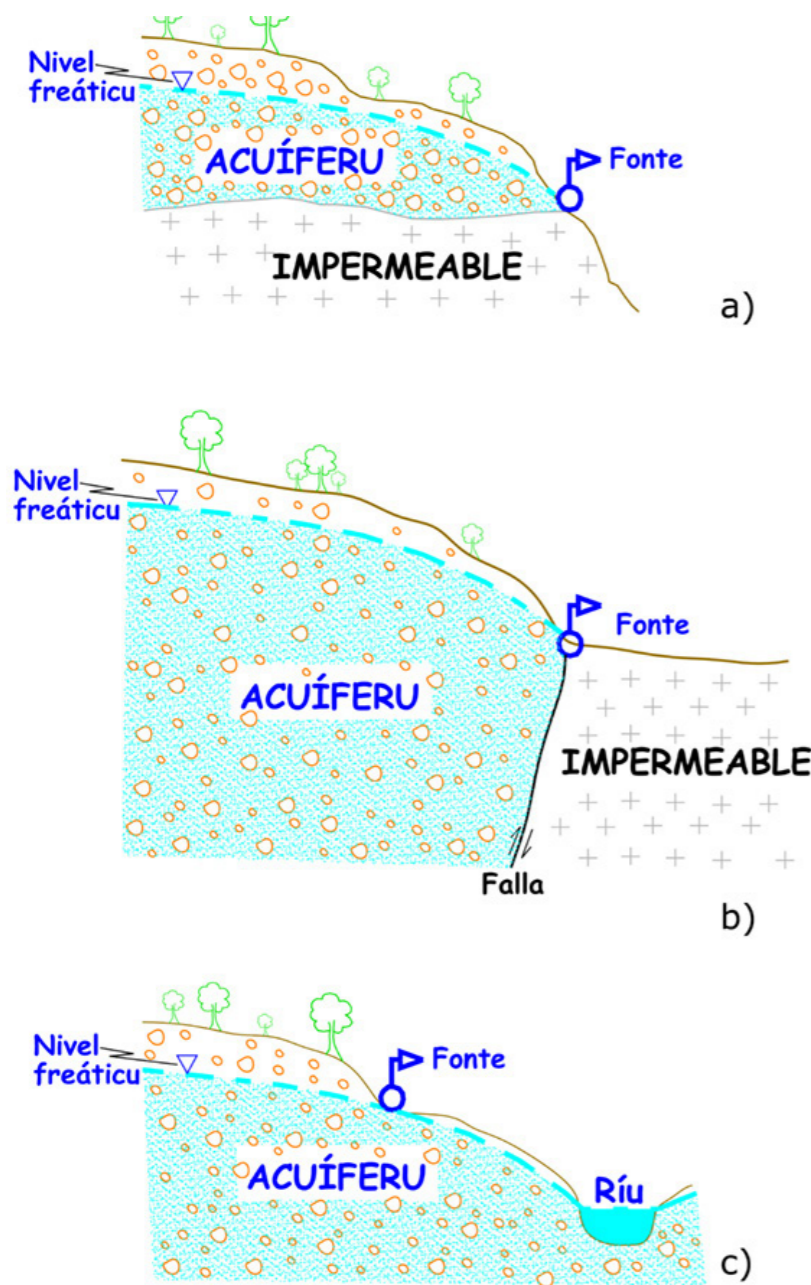
L'agua penetra nos acuíferos peles *zones de recarga*, que son aquelles zones nes que les peñes que constitúin l'acuíferu afloren en superficie o tán anubiertes baxo una cobertura de

l'acuíferu y procede mayoritariamente de la lluvia; la salida natural del agua soterrà a superficie produzse nes zones o puntos de descarga, representaos poles *fontes* y les *zones de drenaxe difusu* (llamargues o llamuergues n'Asturies). Les fontes non siempre son visibles darréu qu'en numberoses ocasiones los acuíferos descarguen l'agua direutamente a los ríos o al mar (fontes somarines).

Los acuíferos puen asimilase a banzaos soterràos nos qu'apenes hai evaporación y nel que'l so rebosaderu natural son les fontes; éstos normalmente surden nel contactu ente materiales permeables ya impermeables (figuras 3a y 3b) o bien por efetu del relieve topográficu, que pue llegar a cortar en

Los acuíferos son más asemeyaos a banzaos soterràos que ríos, corrientes soterràes o «bolses» d'agua como dellos creen

suelu permeable. La recarga d'un acuíferu ye la cantidad d'agua por unidá de tiempu que recibe



ENRIBA
Figura 3. Delloos tipos de fontes

dalgún puntu la superficie freática (figura 3c). Esta idea de banzáu soterraño avérase más a lo que ye un acuíferu que la tan esparrida de «ríos soterraños o corrientes soterrañas» y «bolses d'agua» que defenden los «zahorís». Lo más asemeyao a lo que sedría un ríu soterraño son los acuíferos de peñes carbonataes (caliars y dolomíes, perabondantes n'Asturies) y yelsíferos cuando presenten una elevada *carstificación*¹ manifestada por un ampliu desendolcu de cavidaes coneutaes ente sí peles que pue circular l'agua a mayor velocidá que pelos poros de los acuíferos terrixenos (d'arenas, arenisques, graves). Nos *acuíferos cársticos* l'agua pue permanecer almacenao puntual y temporalmente en torques parcialmente aisllaes y esto ye lo qu'induz a pensar, erróneamente, na existencia de «bolses d'agua».

Los acuíferos, amás de dar llugar a les fontes, dan agua a la escorrentía básica que ye, xunto col agua procedente del desxelu, llagos y banzaos, lo qu'alimenta a los calces superficiales nos estiaxes, nos periodos ensin precipitación. **Ensin esta aportación del agua soterraño tolos ríos llegaríen a secar tres d'un periodu de tiempu ensin lluvia.**

1. Carstificación: procesu de disolución que se produz en dalgunes peñes (caliars, dolomíes, yelsos...) y da llugar a la formación de güecos y conductos pelos que circula l'agua soterraño.

¿POR QUÉ SE MUEVE L'AGUA DENTRO DE LES PEÑES?

Esta entruaga respondiola l'inxenieru francés Henry Darcy en 1856 per mediu d'un esperimentu nel que demostró que'l caudal d'agua, Q, que traviesa un tubo de seición A, rellenu de sable de permeabilidá K, ye direutamente proporcional a éstes y a la diferencia d'altor, Δh, ente'l puntu d'entrada del agua y el de salida, ya inversamente proporcional a la distancia ente entrambos dos puntos, Δl. Esta llei, conocida como *Llei de Darcy* espresase asina:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} = K \cdot A \cdot i$$

La rellación $\Delta h/\Delta l$ denómase *gradiente hidráulicu*, i, y espresa la perda de nivel (piezométricu-freáticu) por unidá de llargor qu'esperimenta l'agua cuando se desplaza pel interior d'un mediu porosu y permeable como son los acuíferos. La perda de nivel implica una perda d'enerxía del agua y esta enerxía equival, en cada puntu del acuíferu, a la suma del so altor (espresáu como la cota topográfica respetive al nivel del mar) más la presión que soporta l'agua nesi puntu (espresao como metros de columna d'agua que tien per encima). Por exemplu, si nun puntu asituiáu a una cota de 300 m.s.n.m. (metros sobro'l nivel del mar), el nivel piezométricu d'un determináu acuíferu ye 325 ms.n.m. y fúrase un sondéu que corta a talu acuíferu a 50 m de fondura, l'agua dentro d'esi sondéu ascendería los 50 m y sedría surdiente, algamando un altor de 25 m per encima de la boca del sondéu.

Pa que l'agua soterraño se desplace ente dos

puntos, estos han de tener diferente nivel piezométricu o freáticu y el fluxu produciráse dende'l puntu de mayor nivel al de menor.

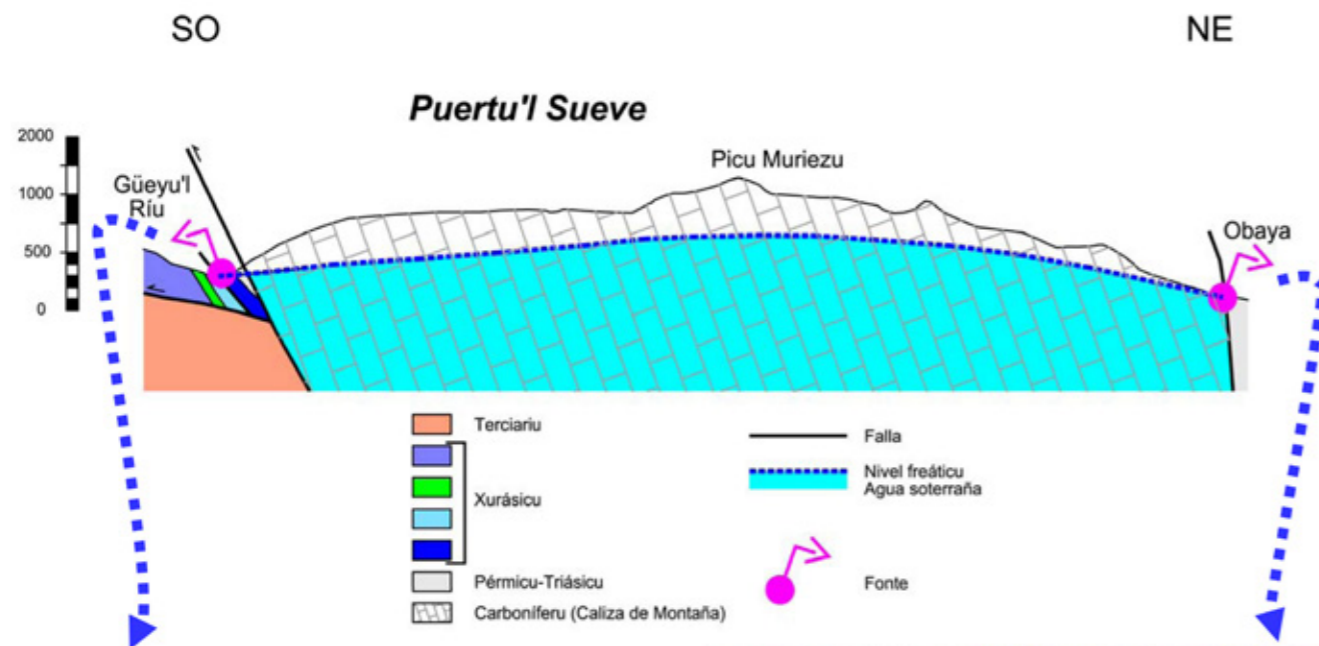
¿CÓMO S'APROVECHA L'AGUA SOTERRAÑO?

Los sistemas d'aprovechamientu de los acuíferos consisten básicamente n'escavaciones que se faen nel terrén, tanto horizontales (galeríes, zanxes) como verticales (pozos, sondeos), p'acceder al nivel onde s'alcuentra l'agua soterraño. Dende'l puntu de vista del aprovechamientu d'un acuíferu ye importante conocer la diferencia ente los recursos y les reserves: los *recursos* son el volume d'agua que se filtra añalmente a los acuíferos, procedente mayoritariamente de les lluvies, y que se descarga direutamente a los calces superficiales y a través de les fontes y les *reserves* son el volume total d'agua almacenao nos acuíferos (nos sos poros, fractures y/o cavidaes cárstiques); utilizando de nuevo el símil de la bañera llena de sable, les reserves sedríen la cantidá total d'agua que fai la bañera y que s'alluga nos güecos qu'hai ente los granos del sable, si se-y amiesta más agua y principia arramase, esi volume d'agua «sobrante» sedríen los recursos.

Una parte d'estos recursos cumple una importante función nel caltenimientu de diversos ecosistemas (aporten agua a los ríos, fontes, zones húmedes, etc) polo que l'aprovechamientu racional d'un acuíferu implica usar namái los llamaos **recursos disponibles** que se definen como la diferencia ente los recursos totales (ye dicir, la recarga añal del acuíferu) y el volume necesariu

ABAXO

Figura 4. Corte hidroxeolóxicu d'El Suevo, nel que se puen ver los dos drenaxes más importantes del acuíferu cársticu formáu poles peñes que constitúin dicha sierra [Caliar de Monte, del Carboníferu]: Fuente Obaya, drenaxe norte y El Güeyu'l Ríu, drenaxe sur.



pal caltenimientu de los ecosistemes. Esto nun quier dicir que nun periodu de tiempu nun pue dan aprovechase les reserves acuíferes per encima de los recursos disponibles, pero ésta ye una actuación que, en xeneral, tien que se restrinxir a los periodos secos. Nesti sen hai que recordar que l'agua, magar ser un elementu esencial pa la vida ye ún de los bienes de la naturaleza más castigaos y degradaos; pero l'agua ye muncho más qu'un recursu productible con interés económicu, pues tien importantes valores patrimoniales, culturales, emocionales, venceyaos al

territoriu, que s'han de defender. Los acuíferos, (al igual que los ríos, llagos y buegues) nun son namái almacenes d'agua sinón ecosistemes indispensables pal caltenimientu de la vida de muchos organismos incluyida la especie humana; de la so conservación en condiciones ecolóxicas acionaes depende la nuesa vida y la de xeneraciones futures.

Bibliografía

- DAVIS, S. N. & R. DE WIEST (1966): *Hydrogeology*. Wiley, 463 pp.
- FERNÁNDEZ, X. R. (1998): *Ecología. Deva, la güella de la diosa astur*. Trabe.Uviéu.
- HALLEY, E. (1687): *An estimate of the quantity of vapour raised out of the see by the warmth of the sun*. *Philosophical Transac. of the Royal Soc.of London*, 16: 366-370.
- HALLEY, E. (1691): *An account of the circulation of watry vapours of the sea, and the cause of springs*. *Philosophical Transac. of the Royal Soc.of London*, 16: 469-473.
- DA VINCI, LEONARDO: *Del moto e misura del acqua*. Publ. por F. Cardinali en: "Raccolta d'autori italiani che trattano del motto dell'acque". Bologna, 1826, pp. 273-450.
- MARIOTTE, E. (1866): *Traité des mouvements des eaux et des autres corps fluides*. E. Michallet. Paris.
- MARTÍNEZ GIL, J. (1972): *Aspecto histórico y evolutivo de las ideas acerca de las aguas subterráneas desde los tiempos más remotos hasta el nacimiento de la Ciencia Hidrogeológica*. Universidad de Salamanca.
- PALISSY, B. (1580): *Discours admirable de la nature des eaux et fontaines*. Versión inglesa: Univ. Illinois Press, 1957.
- PERRAULT, P. (1674): *De l'origine des fontaines*. Pierre le Petit Ed. Paris.
- PULIDO BOSCH, A. (2007): *Nociones de Hidrogeología para Ambientólogos*. Universidad de Almería, 492 pp.
- VITRUVIO, M. P.: *Tratado de Arquitectura*, (Libro VIII).