

CÁLCULO DE LA RECARGA NATURAL EN GRANDES ÁREAS, EN FUNCIÓN DE LA LITOLOGÍA Y LA PRECIPITACIÓN

• Eugenio Sanz-Pérez • Ignacio Menéndez-Pidal •
*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales
 y Puertos de Madrid, España*

Resumen

En una región amplia como España se demuestra —mediante inferencias estadísticas sobre una muestra completa de 875 manantiales en los que se conoce su caudal medio y la litología de su área de alimentación y que han sido agrupados en regiones de distinta pluviometría— que la recarga media anual es una fracción fija de la precipitación media para cada litología. Se han establecido así unas tasas de recarga respecto de la precipitación para seis grupos litológicos de diferente permeabilidad: arenas, gravas y formaciones aluviales en general, 8.3%; conglomerados, 5.6%; areniscas, 7.3%; calizas y dolomías, 34.3%; margas, margocalizas, limos y arcillas, 3.3%; otras rocas, 1.3%. Teniendo en cuenta la representatividad de España, la cual tiene una gran variabilidad de litología, pluviometría, topografía, etcétera, estas tasas de recarga respecto de la precipitación son probablemente valores cuasi universales que pueden ser utilizados para estimar la recarga media o los recursos hídricos subterráneos medios de regiones amplias en cualquier parte del mundo, salvo en regiones especiales, como las que tienen permafrost, por ejemplo. En todo caso, estas tasas de recarga podrían ser retocadas para cada región según sus particulares características. Los datos de precipitación y litología son muy corrientes, por lo que el método puede ser ampliamente utilizado para completar balances hidráulicos.

Palabras clave: recarga natural, balance hidráulico.

Introducción y objetivos

El objetivo de este estudio es proponer una metodología de evaluación global de los recursos hídricos subterráneos de áreas extensas mediante el cálculo de la recarga natural, en función de datos fácilmente disponibles, como son la precipitación y la litología. Se trata de una extensión lógica de otros trabajos anteriores de uno de los autores (Sanz, 1996 y 2001).

El método que aquí se propone tiene como objetivo la evaluación global de los recursos hídricos subterráneos de un país o región grande, y ello permite una mayor amplitud de las escalas tanto temporal como espacial. Y así, en la temporal nos referiremos a valores medios

anuales. La espacial se puede concretar en un territorio más o menos extenso, según el detalle con que se conozca tanto la variación pluviométrica como la distribución litológica; en este estudio se muestran casos cuyas superficies oscilan entre 10^3 y 10^5 km² como órdenes de magnitud.

En esta escala amplia se llega a la conclusión final de que la recarga media anual por unidad de superficie de una determinada litología es una fracción constante de la pluviometría media anual sobre dicha superficie. Esta conclusión ha sido deducida con base en los datos observados en la España peninsular y aunque los resultados parecen bastante fiables, se apunta la conveniencia de su confirmación en otras áreas.

Metodología propuesta

Aportación de los manantiales por cada grupo litológico

Sanz (1996 y 2001) determina unas funciones de distribución de las aportaciones de manantiales según su caudal para nueve grupos litológicos de semejantes características hidrogeológicas (cuadro 1). Se trata de una función genérica del tipo: $a_i(x) = K_i x^{-n_i}$.

Donde $a_i(x)$ representa la aportación de los manantiales de caudal x ; K_i y n_i son unos parámetros característicos de cada grupo litológico. El significado de los dos parámetros K y n se puede interpretar así: K representa la aportación para $x=1$ y es un factor multiplicador de la función potencial; n es la pendiente de la recta en representación logarítmica, y puede interpretarse como una medida de la concavidad de la curva, y a medida que es mayor el valor absoluto de n , los valores de $a(x)$ tienden más rápidamente a sus asíntotas.

El cálculo de estas funciones de distribución de las aportaciones de los manantiales según caudal para los nueve grupos litológicos considerados se explica en Sanz (2001), y básicamente consistió en ajustar la función de distribución general que se obtuvo para las aportaciones de todo el conjunto de manantiales a la de las aportaciones de cada uno de dichos nueve grupos, ya que se observó que la distribución relativa de aportaciones según grupos litológicos era bastante similar a la general.

Luego establece que la aportación de todos los manantiales de cada grupo litológico se puede calcular mediante la integral:

$$A_i = \int_{0.01}^{\text{máx}} K_i x^{-n_i} dx = K_i \left[\frac{x^{1-n_i}}{1-n_i} \right]_{0.01}^{\text{máx}}.$$

Donde los límites de integración van desde 0.01 L/s = 36 L/h como caudal menor para que una surgencia se pueda considerar como manantial hasta el caudal máximo registrado en cada litología.

Efectuada esta integración, se vio que el aporte de las cuatro litologías que pueden considerarse como poco permeables (cuarcitas, pizarras, rocas plutónicas y otras) sólo aportan en conjunto el 5.5% del total, por lo que dichos grupos litológicos se redujeron a cinco grupos aportantes y un grupo que engloba el resto de litologías poco permeables denominada "otras rocas".

Se puede suponer que para una litología concreta, la función de aportaciones es siempre del tipo $a_i(x) = K_i x^{-n_i}$, pero con parámetros distintos según que dicha litología se sitúe en uno u otro lugar con distinta recarga, y sería interesante analizar la variación de estos parámetros en función de las variables que puedan condicionar tal recarga.

En el cuadro 1 se reflejan las funciones de aportaciones según el caudal, así como el valor anual de dichas aportaciones.

Zonas pluviométricas

En varios casos se ha comprobado que para una determinada litología existe un excelente grado de correlación entre la recarga de los acuíferos y las dos variables de pluviometría y temperatura. Ahora bien, si nos referimos a periodos anuales, destaca por su importancia la precipitación, ya que los valores medios anuales de temperatura (y como consecuencia y en cierta medida los de evapotranspiración) son de escasa variación dentro de una región concreta.

Puesto que España es muy variada en climatología, sin salirse de ella, se ha intentado analizar cómo se comportan los manantiales en cuatro zonas de diferente pluviometría. Se ha considerado prudente no establecer más de cuatro zonas, a fin de no reducir demasiado la muestra de manantiales de cada litología en cada zona geográfica al realizar el análisis.

Se han establecido las siguientes cuatro zonas geográficas que tienen diferencias significativas en sus precipitaciones medias anuales:

Zonas	Precipitación (mm/año)
1. Norte (Cantábrico y Galicia)	1 428
2. Centro (Duero, Tajo, Ebro y C.I. Catalanas)	660
3. Sur (Guadiana, Guadalquivir, Sur)	563
4. Levante (Júcar y Segura)	467
Media España peninsular	684

Estimación de la recarga

Al reagrupar la litología, el número de manantiales seleccionados para el análisis constituyen una muestra de 875 manantiales en los que se conocía la litología de su cuenca de alimentación. Para cada uno de ellos se tomó nota de los siguientes datos: zona geográfica, caudal, litología y superficie litológica del acuífero que alimentaba el manantial.

Previo clasificación de los datos anteriores, zonas geográficas, litologías, caudales y superficies litológicas, se han obtenido los totales de

estos grupos. Con base en los resultados de las aportaciones de los cinco grupos litológicos permeables e incorporando las precipitaciones medias de cada zona geográfica, se han elaborado los datos que figuran, resumidos, en el cuadro 2. En dicho cuadro se refleja, dentro de cada litología y para cada zona geográfica, el porcentaje de precipitación que se ha infiltrado.

Los resultados obtenidos son altamente significativos en cuanto a que dentro de cada litología y para esta relación por cociente apenas hay diferencias entre las distintas zonas geográficas. Considerando escalas amplias se llega a la conclusión de que la recarga media anual por unidad de superficie de una determinada litología es una fracción constante de la pluviometría media anual sobre dicha superficie.

Para poder dimensionar la aportación total en la España peninsular es necesario hacer una estimación del porcentaje de precipitación (P_i) destinado a la recarga para el grupo "otras litologías". Teniendo en cuenta

Cuadro 1. Funciones de distribución de las aportaciones de los manantiales y aportación anual.

Grupos litológicos	Área (km ²)	Funciones $a(x)$ de las aportaciones hidráulicas (1)	Integración literal de la parte (2) de $a(x)$ (hm ³)	Aportación hidráulica total	
				hm ³	%
Sedimentos aluviales, gravas, arenas	80 104	$252.0 x^{-1.08}$	$\int^{-1.08} x dx = 11.0$	2 772.0	16.0
Conglomerados	31 141	$55.4 x^{-0.89}$	$\int^{-0.89} x dx = 12.5$	688.8	4.0
Areniscas	19 213	$64.5 x^{-1.02}$	$\int^{-1.02} x dx = 9.2$	593.4	3.4
Calizas y dolomías	74 582	$454.9 x^{-0.81}$	$\int^{-0.81} x dx = 23.2$	10 553.7	61.6
Margas, limos y arcillas	123 963	$146.3 x^{-1.27}$	$\int^{-1.27} x dx = 11.9$	1 741.0	10.1
Otros rocas	168 963	$96.8 x^{-1.44}$	$\int^{-1.44} x dx = 10.0$	963.2	5.5
Total	497 477	$1 069.6 x^{-0.91}$	$\int^{-0.91} x dx = 16.2$	17 312.1	100.0

(1) $a(x)$ en hm³ y x en L/s; (2) las integrales tienen como límite inferior 0.01 L/s y como límite superior el máximo de cada grupo.

Cuadro 2. Porcentaje de precipitación destinado a la recarga (P_i).

Zonas geográficas	1. Aluviales, arenas y gravas	2. Conglomerados	3. Areniscas	4. Calizas y dolomías	5. Margas, limos y arcillas
1	5.0	3.5	4.7	18.3	2.2
2	4.6	3.4	4.1	20.7	2.1
3	5.3	3.2	4.5	21.9	1.9
4	5.0	3.3	4.3	20.7	2.2
Media ($\bar{x}$)	5.0	3.4	4.4	20.7	2.0
σ^2	0.17	0.67	0.05	5.4	0.1
σ	0.4	0.8	0.2	2.3	0.3
$\sigma/\bar{x}(\%)$	8.2	23.5	5.1	11.2	15.1

el escaso valor de la aportación de este grupo, se puede calcular su valor medio con base en los datos contenidos en el cuadro 1 para dicho grupo: superficie, 168 963 km²; aportación, 963.2 hm³. Luego, la aportación por unidad de superficie resulta (963.2/168 963).100 = 0.00057 km³/hm = 5.7 mm/m². Ahora bien, como la pluviometría media es de 687 mm/m², la aportación anterior supone el 0.83% de dicha pluviometría.

Aplicación al cálculo de la España peninsular

Se hace el cálculo tomando como base los parámetros establecidos para la fracción de pluviometría que se recarga, y a falta de datos más precisos se toma para todos los grupos litológicos el valor medio de la pluviometría

nacional anual, esto es, 687 L/m². De acuerdo con ello se elabora el cuadro 3.

Para calcular la aportación de la litología i en hm³ se ha seguido la fórmula:

$$A(i) = S_i \times \text{pluviometría} \times P_i \cdot 10^{-5}$$

Donde S_i se expresa en km² y $A(i)$ en hm³, y la pluviometría en L/m².

Los resultados son bastante parecidos a los reflejados en el cuadro 1, que se obtuvieron por intervención de las funciones $a(x)$ de aportaciones de cada litología. En el conjunto global, la diferencia no llega al 0.1% y la mayor diferencia se sitúa en el grupo litológico de "conglomerados", cuyo cálculo actual es un 5.5% mayor que el del cuadro 1.

Cuadro 3. Estimación de la recarga en la España peninsular.

Grupos litológicos	Área S_i (10 ³ km ²)	Precipitación (L/m ²)	P_i (%)	Aportación hidráulica (hm ³)	Lo mostrado en el cuadro 1
Aluviales, arenas y gravas	80.104	687	5.0	2 752	2 752
Conglomerados	31.141	687	3.4	727	689
Areniscas	19.213	687	4.4	581	593
Calizas y dolomías	74.582	687	20.7	10 606	10 554
Margas, limos y arcillas	123.464	687	2.0	1 696	1 741
Otras rocas	168.973	687	0.8	964	963
Todos	497.477			17 326	17 312

Elevación de resultados a la recarga total natural de España

Para una determinada litología ha quedado contrastado el hecho de que la recarga media anual es una fracción fija de la precipitación media anual caída sobre dicha litología, independientemente de su valor.

En todo lo que antecede, para determinar esta fracción fija se han calculado las aportaciones de los manantiales emergentes y que en conjunto totalizan para la España peninsular 17 326 hm³/año. Las recargas en que se han basado los cálculos anteriores son los reflejados en el cuadro 1, y éstos se calcularon por las aportaciones medias anuales de todos los manantiales, quedando fuera de este cálculo las descargas difusas a los ríos, lagos y mares.

La recarga total media anual como fracción de origen subterráneo de los caudales de los ríos (manantiales y descargas difusas) y las salidas al mar han sido estimadas para el periodo 1940/41 a 1995/96 en España en 28 719 hm³/año (MIMAM, 2000), valor bastante superior al reflejado aquí (17 329 hm³/año). Esto hace suponer que el exceso de ésta sobre la cifra anterior, o sea 11 393 hm³/año, corresponde a las descargas difusas en ríos, mares y lagos.

Partiendo de estas cifras de recarga natural total y teniendo en cuenta que la infiltración en cada litología es una fracción fija de la

pluviometría anual, y suponiendo que las diferencias se mantienen, se obtendrían los nuevos valores de P_i multiplicando los anteriores por 1.66, que es la proporción entre la recarga natural total y la descargada por los manantiales emergentes. Así, se tendrían los siguientes factores P_i (porcentaje de lluvia recargada en la litología i para un balance anual), que se refleja en el cuadro 4, y que corresponderían a la España peninsular.

Y si S_i expresa la superficie de la litología i en km² y P_m la pluviometría media anual en L/m², todo ello referido a un determinado territorio o país, el cálculo de la recarga en régimen natural sobre la litología i puede hacerse con la fórmula:

$$\text{Recarga natural (hm}^3\text{)} = S_i \cdot P_m \cdot P_i \cdot 10^{-5}$$

De los resultados para la recarga natural de la España peninsular se destaca el que la litología de calizas y dolomías, que ocupa el 15% de toda la superficie, proporciona el 61.4% de toda la recarga; y que el grupo de rocas poco permeables, que ocupa el 39% (más de la tercera parte del territorio), sólo aporta el 5.3% a la recarga total.

Los factores P_i del cuadro 4 se refieren a la España peninsular y, en sentido estricto, su aplicación idónea sería en subregiones pertenecientes a la propia España. Es evidente que para regiones pequeñas o medianas, la

Cuadro 4. Rangos de recarga con respecto a la precipitación en función de los grupos litológicos.

Litologías	P_i (%)	Recarga de España peninsular	
		hm ³	%
Aluviales, gravas y arenas	8.29	4 562	15.9
Conglomerados	5.63	1 204	4.2
Areniscas	7.29	962	3.4
Calizas y dolomías	34.31	17 580	61.4
Margas, limos y arcillas	3.32	2 816	9.8
Otras rocas	1.32	1 532	5.3
Total		28 656	100

proporción recarga destinada a manantiales/ recarga total puede ser muy variable, pero para regiones grandes, de miles de km², podría ser parecida a la estimada en España.

Se considera que España es una región suficientemente grande y representativa, con una geología, litología, pluviometría, relieve y vegetación muy variados. Además, se conoce con bastante precisión la recarga total.

Conclusiones

Este trabajo presenta una nueva técnica para la estimación de la recarga natural media de regiones extensas con base en el establecimiento de unos índices o tasas de recarga respecto de la precipitación para seis grupos litológicos de diferente permeabilidad.

El método se apoya inicialmente en la muestra de estadísticas de manantiales que sirvió para establecer funciones específicas de distribución de la aportación hídrica de los manantiales según su caudal para distintos grupos litológicos de la España peninsular (Sanz, 2001), confirmando la validez de la función logarítmico normal general de Sanz (1996).

Se demuestra posteriormente mediante inferencias estadísticas sobre una muestra completa de manantiales superiores a 10 L/s en los que se conoce su caudal y litología de su área de alimentación, agrupados en cuatro regiones de distinta pluviometría de España, que la recarga es una fracción fija de la precipitación media para cada litología, y que es independiente de la temperatura.

Las tasas de recarga según precipitación se obtienen mediante un ajuste de los índices provisionales obtenidos a la recarga total estimada en régimen natural en España por el *Libro Blanco del Agua* (MIMAM, 2000), para que se tengan también en cuenta las descargas difusas.

Se establecen así las siguientes tasas de recarga respecto de la precipitación para los seis grupos litológicos considerados:

Litologías	Tasa de recarga respecto de la precipitación en España (%)
Aluviales	8.3
Conglomerados	5.6
Areniscas	7.3
Calizas	34.3
Margas	3.3
Otras rocas	1.3

El método que se propone ya está ajustado, por lo que no exige series históricas, y el cálculo de la recarga media se basa en el conocimiento de la distribución de la superficie de una cuenca hidrográfica, región o país, según seis grupos litológicos. Una vez conocida esta distribución, se puede aplicar el cálculo de la recarga media o de la recarga anual con sólo el conocimiento del valor de la precipitación anual que cae en cada grupo litológico aplicado a las tasas de recarga de España que pudieran considerarse representativas o de otras que hayan podido ajustarse en cada región. Como en la España peninsular no hay apenas rocas volcánicas, la tasa de recarga de este grupo litológico no se presenta aquí y será necesario estimarlo de otras regiones. Esto puede ser importante en América Latina, donde este tipo de rocas son abundantes. Ello quiere decir que el método se puede aplicar, salvo en regiones de clima muy frío u otros casos extremos (permafrost), a cualquier región o país, pues la precipitación y la litología son datos de fácil adquisición.

Con este método se podrían evaluar de manera aproximada y preliminar los recursos hídricos subterráneos de amplias regiones del mundo, como América Latina, por ejemplo, con sólo conocer dos datos que son de fácil adquisición: litología y precipitación media.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en parte dentro del Convenio de Colaboración de la Fundación Agustín de Betancourt de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, y el Centro de Estudios Hidrográficos, bajo la supervisión de Manuel Menéndez (Sanz, 2002).

Queremos agradecer al editor de la revista y a los revisores anónimos las sugerencias y observaciones realizadas, que han servido para mejorar la nota técnica.

Recibido: 10/09/10

Aceptado: 21/01/11

Referencias

MIMAM. *Libro Blanco del Agua en España*. Madrid: Ministerio del Medio Ambiente – Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, Centro de

Publicaciones de la Secretaría General Técnica MIMAM (editores), 2000, 637 pp.

SANZ, E. Springs in Spain: classification according to their flows and lithologies and their hydraulic contributions. *Ground Water*. Vol. 34, No. 6, 1996, pp. 1033-1041.

SANZ, E. Distribution functions of spring discharge according to their lithologies and the influence of lower limit to flow in Spain. *Ground Water*. Vol. 39, No. 2, 2001, pp. 203-209.

SANZ, E. *Realización de estudios relacionados con la caracterización de manantiales y su aplicación al cálculo de la recarga natural de los acuíferos en la Cuenca del Duero*. Informe Inédito. Madrid: Fundación Agustín de Betancourt, Centro de Estudios Hidrográficos, 2002.

Abstract

SANZ-PÉREZ, E. & MENÉNDEZ-PIDAL, I. Calculation of natural recharge in large areas, as a function of lithology and rainfall. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 1, January-March, 2013, pp. 195-202.

In a region as large as Spain, annual mean recharge is shown to be a fixed proportion of the mean rainfall for each lithology. This determination is based on statistical inferences from a complete sample of 875 springs for which mean flow and catchment areas are known and which have been grouped into distinct rainfall regions. Recharge rates have thus been established with respect to rainfall for six lithological groups with different permeability: sands, gravels and generally alluvial formations, 8.3%; conglomerates, 5.6%; sandstones, 7.3%; limestone and dolomite 34.3%; marls, marly limestones, silts and clays, 3.3%; and hard rocks, 1.3%. Considering the representativeness of Spain, which is large in size and has a highly varied lithology, topography and rainfall, these recharge rates for rainfall are probably quasi-universal values that can be used to estimate average recharge or average groundwater resources of large regions in any part of the world (except in special cases such as areas with permafrost, for example). For any case, these recharge rates can be adapted to each region according to its particular characteristics. Rainfall and lithology data are very common, and so the method can be widely used to calculate hydraulic balances.

Keywords: natural recharge, hydraulic balance.

Dirección institucional de los autores

Dr. Eugenio Sanz Pérez

Dr. Ignacio Menéndez Pidal

Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos de Madrid, España
C. Prof. Aranguren s/n 28040 Madrid, ESPAÑA

Teléfono: +34 (91) 3366 793

Fax: +34 (91) 3366 774

esanz@caminos.upm.es

impidal@caminos.upm.es