

Consideraciones sobre el rendimiento en el desarrollo por acidificación de sondeos en acuíferos kársticos

*Angel Lozano Vega**
*José Benavente Herrera**
*Antonio Castillo Martín**
Rafael Fernández-Rubio

RESUMEN

Se estudia la relación existente entre los incrementos en el caudal específico de los sondeos de captación, en acuíferos kársticos, y el número de acidificaciones realizadas. De acuerdo con el análisis estadístico de los datos estudiados, se concluye que no cabe esperar incrementos espectaculares, en el aumento de dichos caudales, a partir de la tercera acidificación, para una misma captación (en algunos casos los resultados llegan a ser negativos).

INTRODUCCION

La acidificación (mediante clorhídrico diluido), como método de desarrollo de sondeos de captación de aguas, en rocas carbonatadas, es un procedimiento cada día más utilizado y que se muestra, en general, muy eficaz para el aumento del caudal específico. Dicha consideración ha sido puesta de manifiesto por distintos autores. KOENIG (1960); llevó a cabo un

*Cátedra de Hidrogeología. Universidad de Granada.

estudio estadístico sobre gran número de acidificaciones en sondeos, del cual obtuvo que el 80% de los mismos conseguían mejoras importantes en su caudal específico (aumentos entre el 0 y el 1.100%), mientras que el 20% restante correspondía a situaciones en que no se conseguían mejoras, o los resultados eran negativos.

CSALLANY y WALTON (1963) estudiaron también el aumento del caudal específico en acuíferos carbonatados, tras el desarrollo mediante acidificación. En el 50% de los sondeos de nueva construcción, el aumento fue superior al 10%, mientras que en el 50% de los sondeos rehabilitados aumentó su caudal específico por encima del 150%. Lo que parece evidenciar que este desarrollo proporciona mejores resultados en sondeos ya puestos en producción, con respecto a los que se acaban de realizar.

Nuestra experiencia es de que el desarrollo por acidificación da resultados más favorables cuando se ejecutan varios tratamientos sucesivos, en diversos escalones de acidificación y, en ocasiones, con incrementos paulatinos del volumen de ácido. Sin que esto último tenga una respuesta proporcional en los resultados obtenidos, se observa que, en cada paso, se consigue mejorar el caudal específico, aunque éste incremento decrece exponencialmente, a medida que se suceden los tratamientos en el sondeo. A pesar de ello, es difícil predecir el aumento que va a producirse en cada nuevo escalón, e incluso debe considerarse la posibilidad de que los resultados sean negativos al cabo de varios escalones.

PLANTEAMIENTO ESTADISTICO

Hasta ahora no existe una investigación profunda relativa al número de tratamientos que deben realizarse, en un desarrollo con ácido, lo cual está justificado por el hecho de que cada experiencia práctica muestra un marcado carácter puntual y resulta arriesgado generalizar, sobre todo en acuíferos carbonatados, los cuales presentan una notable anisotropía en su permeabilidad, debida a procesos de fisuración y karstificación.

Sin embargo, queremos establecer unas consideraciones, en base a un planteamiento estadístico, aplicado a los resultados obtenidos en dos campañas distintas de acidificación, realizadas bajo presión, en sendos acuíferos carbonatados. Ambas campañas se realizaron por BRUMAGNE (1976) y ROUX y

TREMEMBERT (1977), en Francia, y los datos obtenidos se resumen en las tablas 1 y 2. Estos datos se refieren a los caudales específicos (l/s/m), antes y después de las sucesivas acidificaciones, así como al incremento de los caudales específicos (expresado en %), tras cada tratamiento respecto al original (antes del desarrollo). Dichos datos los hemos representado en un diagrama de frecuencias, al mismo tiempo que, se ha trazado la curva acumulativa (la figura 1 corresponde a los valores de la tabla 1, y la figura 2 a los de la tabla 2).

Sin tener en cuenta otros factores, condicionantes en el proceso, hemos observado lo siguiente:

a) En la primera acidificación, el 80% de los sondeos experimentan un incremento de caudal específico comprendido entre el 0 y el 200%, respecto al valor inicial.

b) En la segunda acidificación, más del 80% tiene un incremento entre el 0 y el 350%, respecto al caudal específico primitivo, aunque, si se tiene en cuenta el aumento respecto a la primera acidificación, resulta que más del 50% de los casos han experimentado un incremento entre el 5 y el 50%.

c) En la tercera acidificación, el porcentaje disminuye sensiblemente y, en este caso, es aproximadamente el 70% de los sondeos los que incrementan su caudal específico entre el 50 y el 350% respecto al inicial. Si se analiza el aumento, en comparación con la segunda acidificación, se observa que más del 50% de los sondeos aumentaron sólo entre el 3 y el 25%.

d) De manera global sólo un 10%, aproximadamente, experimentaron un aumento del caudal específico superior al 350%.

En las figuras 1 y 2 puede apreciarse que, a medida que se realiza una nueva acidificación, la curva acumulativa presenta menor pendiente. Este hecho confirma la progresiva disminución del rendimiento, a medida que se acumulan tratamientos, razón por la cual llegará un momento en el que las mejoras no serán significativas.

Otro punto de vista, que ratifica los argumentos expuestos, se deduce de las figuras 3 y 4, en las que hemos representado la evolución del incremento del caudal específico a lo largo de diversos escalones (los datos corresponden a los valores de las tablas 1 y 2, respectivamente).

Se observa la existencia, en ambos casos, de dos grupos de curvas. Uno de ellos posee una pendiente elevada, y corresponde a aquellos sondeos que tienen caudal específico inicial (anterior al desarrollo) superior a 1 l/s/m. El otro grupo de

Denominación del sondeo	Caudal específico de la acidificación antes		Después de la 1.ª acidificación		Después de la 2.ª acidificación		Después de la 3.ª acidificación		Después de la 4.ª acidificación		Después de la 5.ª acidificación	
	Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial	Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial	Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial	Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial	Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial	Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial
H ₁	13,0	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H ₂	8,1	37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H ₃	12,2	24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H ₅	6,5	130	20,0	207	23,1	255	—	—	—	—	—	—
H ₆	4,7	23	6,4	36	8,0	70	—	—	—	—	—	—
N ₂	7,6	193	25,4	234	20,6	171	—	—	—	—	—	—
N ₉	23,6	77	54,0	128	38,2	61	—	—	—	—	—	—
N ₁₀	10,4	83	35,8	244	30,8	196	—	—	—	—	—	—
G ₁	1,8	200	6,8	277	7,7	327	—	—	—	—	—	—
G ₂	1,1	136	2,9	163	3,0	172	—	—	—	—	—	—
G ₅	1,0	100	2,1	110	—	—	—	—	—	—	—	—
G ₇	0,3	433	2,0	566	—	—	—	—	—	—	—	—
G ₈	1,2	108	2,5	108	—	—	—	—	—	—	—	—
G ₉	0,3	433	2,9	866	3,4	1.033	—	—	—	—	—	—
SPY	0,2	250	0,9	350	1,4	600	2,0	900	2,4	1.100	—	—

Cuadro 1. Resultados de la campaña de acidificación realizada por BRUMAGNE, 1976.

Denominación sondeo (Índice BRGM)	Caudal específico antes acidificación (l/s/m)	Después de la 1.ª acidificación		Después de la 2.ª Acidificación		Después de la 3.ª Acidificación	
		Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial	Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial	Caudal específico (l/s/m)	% aumento respecto al Q inicial
100-7-59	4,4	6,1	38	7,8	77	—	—
124-1-314	0,4	3,2	700	7,9	1.875	—	—
124-6-219	2,5	6,0	140	8,4	236	—	—
151-1-165	5,5	7,4	34	8,0	46	—	—
124-6-231	2,0	2,5	25	7,5	275	14,0	600
75-2-38	4,5	5,2	15	7,3	72	—	—
99-8-249	1,1	3,2	190	4,2	281	5,2	372
124-2-422	0,3	4,2	1.300	5,1	1.600	—	—
100-7-78	1,0	1,2	20	2,2	120	—	—
75-8-56	0,5	0,8	60	1,1	420	3,7	640
100-8-85	0,4	1,6	300	1,8	350	—	—
76-5-115	0,1	0,7	600	1,2	1.100	—	—

Cuadro 2. Resultados de la campaña de acidificación realizada por ROUX y TREMBERT, 1977

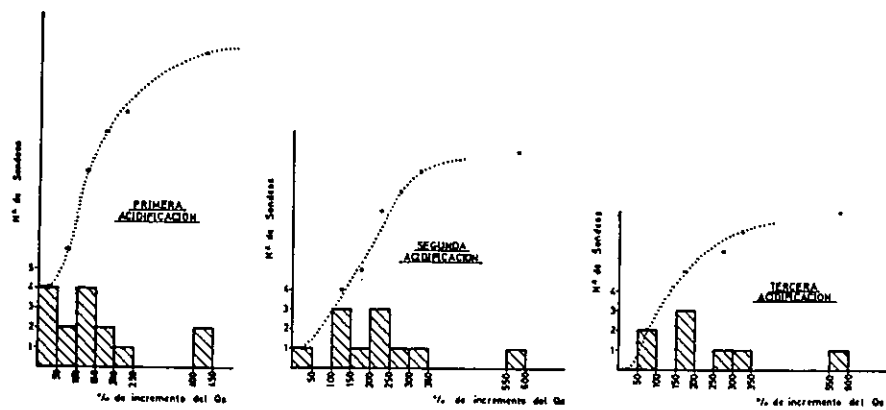


Figura 1.—Diagramas de frecuencia y curvas acumulativas, en sucesivas acidificaciones, para la campaña realizada por BRUMAGNE, 1976.

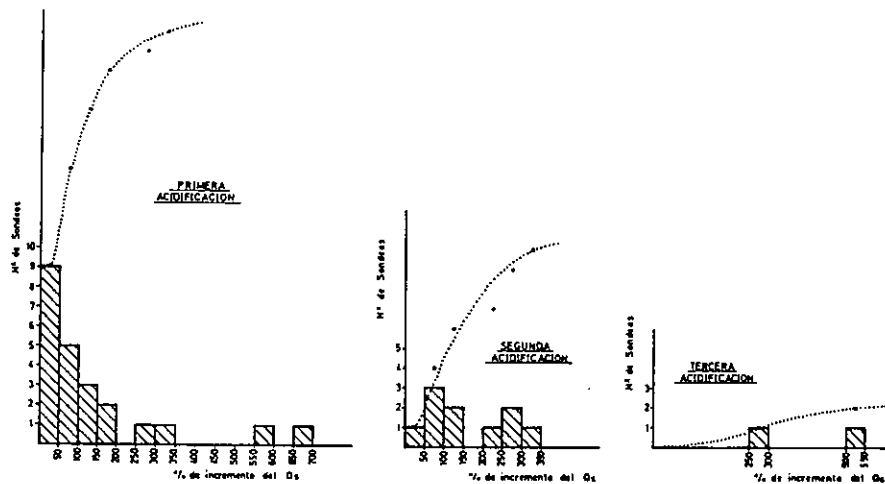


Figura 2.—Diagramas de frecuencia y curvas acumulativas, en sucesivas acidificaciones, para la campaña realizada por ROUX y TREMENBERT, 1977.

curvas, de menos pendiente, corresponde a sondeos con caudal específico inicial inferior a 1 l/s/m. En este último caso se trata, por lo general, de sondeos que presentan gran descenso de nivel, frente a extracciones de caudales que suelen ser bajos.

Es evidente que cualquier mejora de la producción consigue, en general, que los descensos dinámicos dentro del sondeo, no sean tan acusados, sin que por ello aumenten, considerablemente, los caudales extraídos; esta es la causa por la que se produce un aumento muy neto del caudal específico de un paso

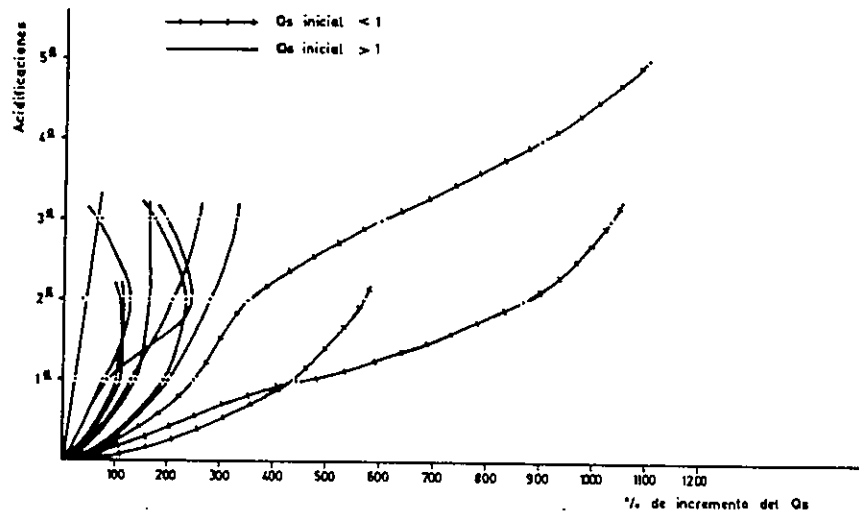


Figura 3.—Evolución del aumento del caudal específico (%-, a lo largo de sucesivas acidificaciones, para la campaña realizada por BRUMAGNE, 1976.

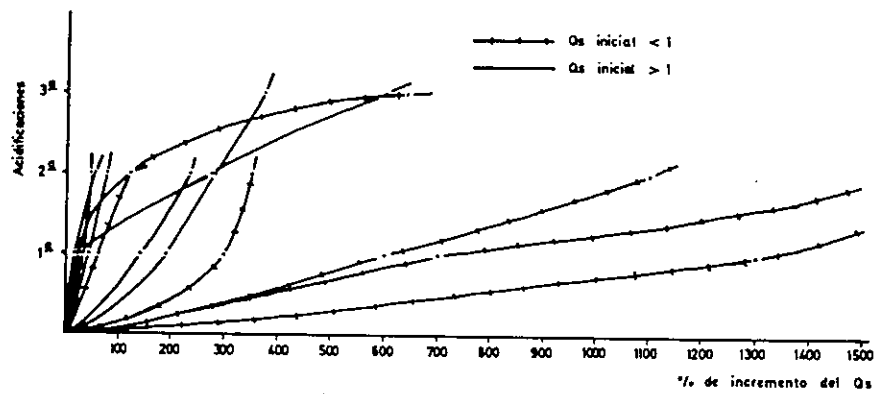


Figura 4.—Evolución del aumento del caudal específico (%-, a lo largo de sucesivas acidificaciones, para la campaña realizada por ROUX y TREMBERT, 1977.

a otro, y de ahí la poca pendiente de dichas curvas. En lo que se refiere a las curvas de mayor pendiente, observamos que una cuarta o quinta acidificación no produciría aumentos considerables, en el caudal específico (por regla general, los incrementos del caudal específico a partir de la cuarta acidificación, respecto de la tercera, no alcanzan el 20%, y aún menos en la quinta), y en algunos casos, incluso, se puede producir un efecto negativo.

Un argumento adicional, en favor de no realizar más de tres tratamientos sucesivos, se deriva de la fórmula expuesta por MUSKAT (1949), para el caso de una «acidificación de matriz» («Matrix Acidizing»), y que se refiere a la acidificación de los huecos porosos, distribuidos uniformemente en la roca, con presiones que no llegan a provocar la fractura del material acuífero. Dicha fórmula relaciona la productividad de un sondeo, antes de acidificar, respecto a la del mismo en el caso ideal en el que no existiera una aureola «dañada» alrededor de la rejilla (figura 5).

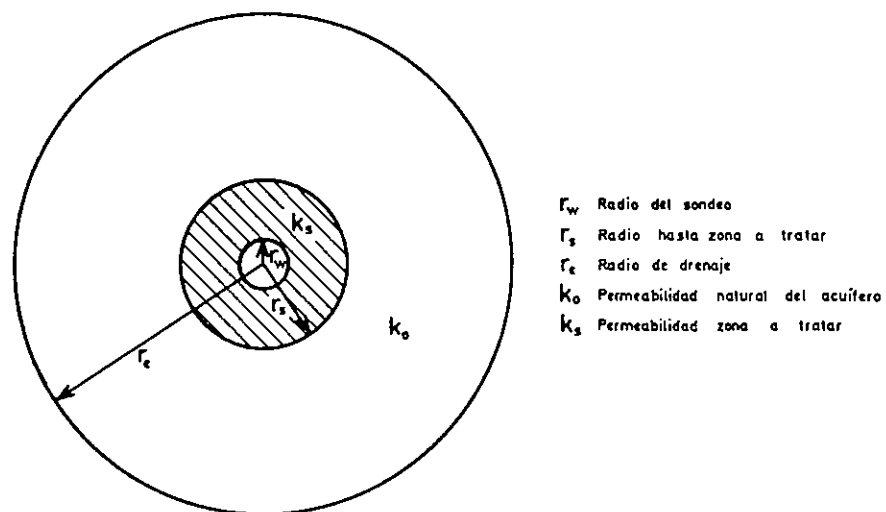


Figura 5.—Corte esquemático radial de un sondeo que presenta un «anillo» de menor permeabilidad.

$$\frac{J_s}{J_o} = \frac{F_k \log r_e / r_w}{\log r_s / r_w + F_k \log r_e / r_s} \quad (\text{MUSKAT, 1949})$$

donde:

- J_s = productividad antes de acidificar,
 J_o = productividad sin que exista aureola «dañada», alrededor del sondeo,
 $F_k = k_s / k_o$,
 k_s = permeabilidad natural del acuífero,
 k_o = permeabilidad de la zona «dañada»,
 r_w = radio del sondeo,
 r_s = radio de la zona a tratar (desde el centro del sondeo)
 r_e = radio de drenaje.

Esta fórmula puede representarse gráficamente. Así lo hace MUSKAT, para el caso de un sondeo con un radio de acción de 660 pies (200 m), y un radio de perforación de 0,33 pies (0,1 m.) (figura 6).

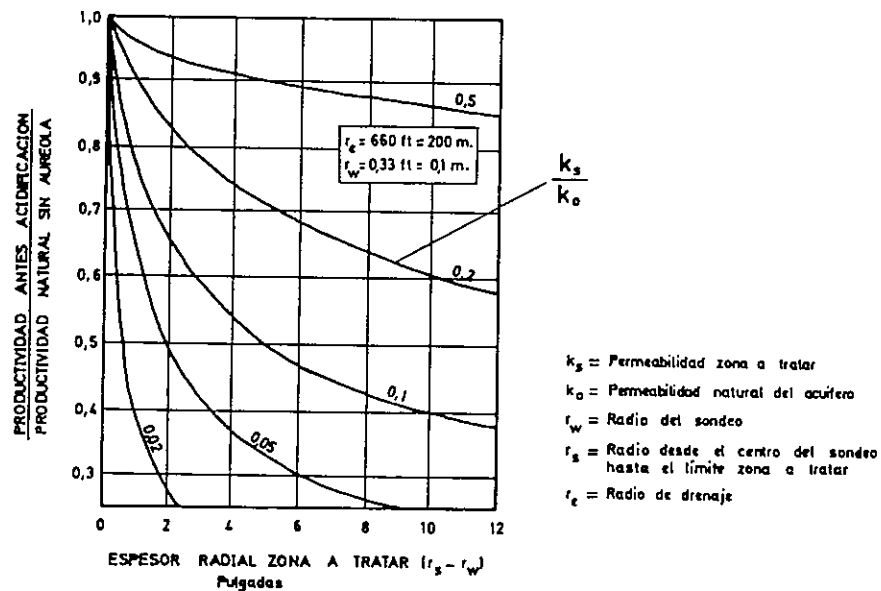


Figura 6.—Pérdida de productividad causada por la formación de un «anillo» de menor permeabilidad, alrededor del sondeo, para un flujo radial (MUSKAT, 1949).

Si tenemos en cuenta que en cada acidificación se consigue duplicar la relación de permeabilidades (es frecuente que aumente más), tendremos un aumento considerable de la productividad después de un tercer tratamiento. Así, por ejemplo, para un espesor de la aureola de 6 pulgadas, con una relación de permeabilidades de 0,05, el índice de productividad pasaría de 0,3 a 0,89. Este argumento no tendría validez para el caso de sondeos que cortasen acuíferos con fracturas aisladas, donde la producción tendría un comportamiento muy variable, en función de las condiciones hidráulicas, y del número de fracturas atravesadas.

CONCLUSIONES

El análisis estadístico de los datos empleados, muestra que, en el desarrollo por acidificación, se obtienen resultados apetecibles cuando se realizan tres escalones sucesivos, siempre y cuando se ejecuten adecuadamente, y no hay que esperar incrementos rentables tras nuevos tratamientos (en algunos casos incluso, el caudal específico disminuye después del segundo escalón). Esto último puede producirse, bien por la utilización de una técnica inapropiada, o por la obturación de poros y fisuras mediante hidróxidos o partículas arcillosas, integradas en la matriz de roca carbonatada, que se acumulan a través de sucesivas acidificaciones, y que no se eliminan adecuadamente, por lo que tiene gran importancia seleccionar y controlar el método idóneo de acidificación en cada caso particular, y los aditivos a emplear.

Como la rentabilidad de una acidificación se consigue cuando el caudal específico aumenta por encima del 25 al 30%, respecto del inicial (CUSTODIO y LLAMAS, 1976), y esto se consigue, normalmente, con las dos o tres primeras acidificaciones, no es aconsejable, en general, realizar más de tres tratamientos en cada sondeo (según KOENIG, 1960, el costo de una acidificación puede llegar a alcanzar un 40% del precio original del sondeo).

Un estudio detallado, en base al tratamiento de muchos más parámetros, actualmente en fase de realización (LOZANO, en elaboración), esperamos aporte datos de interés.

BIBLIOGRAFIA

- BRUMAGE, D 1976. *Le developpement de forages captants par acidification dans les craies senoniennes et les calcaires dinantiens. Deuxieme Colloque d'Hydrologie en pays calcaire. Fasc. 25, 3ème série, 119-125. Annales Scientifiques de l'Universite de Besançon.*
- CSALLANY, S. y WALTON, W. C. 1963. *Yields of shallow dolomite wells in Northern Illinois.* Report Investigation 46, Illinois State Water Survey 43 pp.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. 1976. *Hidrología subterránea.* Ed. Omega. Barcelona. 2.359 pp.
- KOENIG, L. 1960 *Economic aspects of water well stimulation.* Journ. Amer. Water Works Assoc. Vo. 52, n.º 5.
- LOZANO, A. (en elaboración). *Desarrollo de sondeos de captación por acidificación.* Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.
- MUSKAT, M. 1949. *Physical principles of oil production.* McGraw-Hill Books Co. Inc., New York. 242 pp.
- ROUX, J. C. y TREMBERT, J. 1977. *Amelioration de la productivité des forages a la nappe de la craie par acidification. Colloque National Les Eaux Souterraines et l'Approvisionnement d'Eaux de la France.* Service Géologique National. Nice.