

Pauta P2C2

Estrato	Campaña	Porosidad ()	Sy ()	θ_r ()	Ss (1/m)
Superior	1	0,60	0,15	0,3	1×10^{-5}
Superior	2	0,25	0,2	0,05	2×10^{-4}
Superior	3	0,20	0,16	0,03	1×10^{-5}
Inferior	2	0,15	0,12	0,03	1×10^{-7}
Inferior	3	0,015	0,01	0,0	2×10^{-7}

- a) El objetivo es determinar el volumen almacenado (drenable) del sistema y compararlo con el volumen extraído en todo el periodo de operación. El volumen almacenado drenable depende de dos parámetros intrínsecos de cada estrato: la porosidad drenable (Sy) y el coeficiente de almacenamiento confinado (Ss).

De esta forma, los parámetros que interesan son estos dos, pero los otros parámetros medidos en cada campaña permiten asignar un grado de confianza en la validez del conjunto completo de datos.

Estrato superior - Campaña 1

El valor de porosidad es extremadamente alto para el tipo de material, y el valor de la humedad residual no es consistente con el de la porosidad drenable (Sy). Esta campaña es la menos confiable. El valor del Ss podría ser razonable para este tipo de suelo.

Estrato superior - Campaña 2

El valor de porosidad total, porosidad drenable y humedad residual son consistentes, y valor de Ss es razonable.

Estrato superior - Campaña 3

Los valores de porosidad total, porosidad drenable, humedad residual y Ss son consistentes y razonables para el tipo de material. Estos parámetros entregarían una estimación del volumen almacenado drenable menor que aquellos comparados con la campaña 2.

Valores seleccionados para análisis en estrato superior:

Sy = 0,16 y Ss = 1×10^{-5} 1/m. Corresponden a valores razonables para el tipo de material y son los que además entregarán el menor volumen almacenado drenable.

Notar que, si la respuesta se enfocó en el volumen almacenado total entonces el único cambio es que en vez del Sy, se debe considerar la porosidad total. En cualquier caso se debe considerar el efecto del coeficiente Ss por las razones que se explican en la parte b. Se debe acotar que el volumen almacenado total, rara vez es de interés en una evaluación de recursos, por cuanto la parte residual no se puede extraer gravitacionalmente (con bombeo) y en este sentido bien podría considerarse que es parte de la matriz sólida.

Estrato inferior

La campaña 2 entrega valores de porosidad total y de porosidad drenable que no son consistentes para el tipo de material. Problema que no ocurre con la campaña 3. Sin embargo, el valor de S_s de la campaña 2 es suficientemente similar al de la campaña 3, es razonable para el tipo de material, y es más conservador para estimación de volumen drenable.

Valores seleccionados para análisis en estrato inferior:

$S_y = 0,01$ y $S_s = 1 \times 10^{-7} \text{ 1/m}$.

- b) Para esta parte, la clave es recordar que **la porosidad de un suelo cambia en la medida que el agua almacenada gana presión** (o equivalentemente carga hidráulica). Lo mismo ocurre con la densidad del agua, aunque el efecto de su elasticidad en el cambio de la capacidad de almacenar agua de un suelo es, generalmente, mucho menor que el cambio en la porosidad. El **coeficiente de almacenamiento específico S_s** es una propiedad intrínseca de los medios porosos que captura estos dos efectos: el cambio en la porosidad y el cambio en la densidad del agua por efecto de la presión (o carga hidráulica).

Este efecto de cambio en la capacidad de almacenamiento a medida que aumenta la presión es independiente de la condición freática del acuífero; es decir, **es independiente de si el acuífero es libre o confinado**. Los cambios de la porosidad y de la densidad del agua están considerados en la estructura misma de la deducción de la ecuación tridimensional que rige el flujo en medio poroso (son incluso independientes de la validez de la Ley de Darcy).

Otro elemento que **contribuye inherentemente a la capacidad de almacenamiento de un suelo es su porosidad drenable (η_d o S_y)**. Este coeficiente mide la cantidad de agua que un suelo puede almacenar sólo por el hecho de ocupar espacio vacío entre la matriz sólida. De esta forma, siempre es también una componente del cálculo del volumen almacenado drenable.

Lo anterior es totalmente consistente con el hecho de que el coeficiente **S** adopta formas diferentes para acuíferos libre y para acuíferos confinados. El coeficiente **S** es una definición que se hace meramente para simplificar la notación, cuando la ecuación tridimensional ha sido integrada en la vertical bajo el supuesto de Dupuit (equipotenciales verticales).

$$\begin{array}{ll} S = S_y + h \cdot S_s & \text{en Acuíferos libres} \\ S = b \cdot S_s & \text{en Acuíferos confinados} \end{array}$$

Es decir, en acuíferos confinados la porosidad drenable no forma parte del coeficiente S. Sin embargo, esto no quiere decir que no aporte al volumen almacenado, como se verá en la deducción que se presenta a continuación.

Recordemos que por su naturaleza, el coeficiente S puede interpretarse como el volumen que se almacena o libera, por unidad de área, ante un cambio unitario de la carga hidráulica. No es que se defina de esta forma. El coeficiente surge de la derivación de las ecuaciones.

Para entender mejor el problema, suponga que ambos estratos comienzan completamente secos. Luego, el llenado ocurre lentamente desde abajo, primero en el estrato de roca fracturada como se muestra en la figura A.

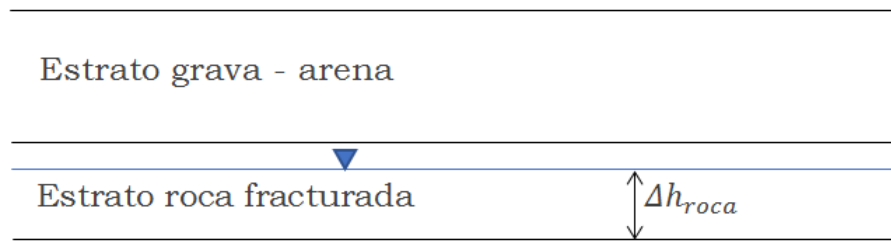


Figura A: Estrato de roca fracturada como acuífero libre.

En esta condición, el acuífero de roca es un acuífero libre, hasta que el nivel freático Δh_{rocka} alcance el techo del estrato, por lo que el almacenamiento corresponde a:

$$V_1 = S \cdot \Delta h_{rocka} \cdot A = (S_{y_{rocka}} + \Delta h_{rocka} \cdot S_{s_{rocka}}) \cdot \Delta h_{rocka} \cdot A$$

A es el área basal del acuífero, y cuando el nivel freático se encuentra justo en su techo, Δh_{rocka} es igual al espesor del estrato, b_{rocka} .

Suponga ahora, que el nivel sigue subiendo un Δh_2 y comienza a llenarse el estrato de grava-arena, tal como se indica en la figura B. Mantengamos el análisis solo en el estrato de roca, el que ahora se comporta como confinado (el cambio de carga hidráulica ocurre sobre su límite geométrico). De esta manera, el almacenamiento adicional en el estrato de roca está dado por:

$$V_2 = S \cdot \Delta h_2 \cdot A = (b_{rocka} \cdot S_{s_{rocka}}) \cdot \Delta h_2 \cdot A$$

De forma que el volumen total almacenado en roca es:

$$V_1 + V_2 = (S_{y_{rocka}} + \Delta h_{rocka} \cdot S_{s_{rocka}}) \cdot \Delta h_{rocka} \cdot A + (b_{rocka} \cdot S_{s_{rocka}}) \cdot \Delta h_2 \cdot A$$

$$V_1 + V_2 = (S_{y_{rocka}} + b_{rocka} \cdot S_{s_{rocka}}) \cdot b_{rocka} \cdot A + (b_{rocka} \cdot S_{s_{rocka}}) \cdot \Delta h_2 \cdot A$$

$$V_1 + V_2 = Sy_{roca} \cdot b_{roca} \cdot A + b_{roca} \cdot Ss_{roca} \cdot (b_{roca} + \Delta h_2) \cdot A$$

$$V_1 + V_2 = Sy_{roca} \cdot b_{roca} \cdot A + b_{roca} \cdot Ss_{roca} \cdot \Delta h_{total} \cdot A$$

Por su parte, el volumen en el acuífero de grava y arena, corresponde solo a aquel que genera el segundo incremento de h , y que ocurre en condiciones de acuífero libre.

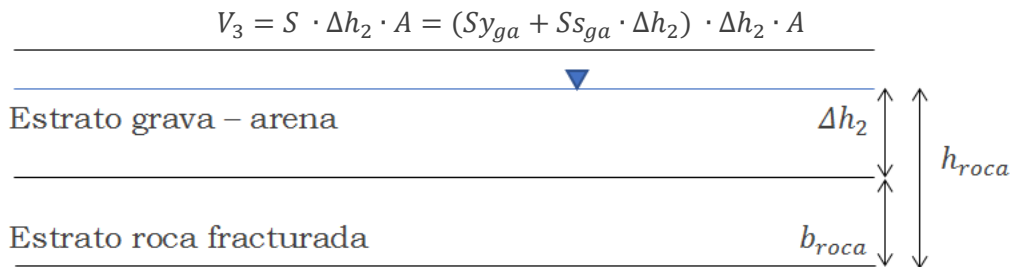


Figura B: Estrato de grava - arena como acuífero libre.

De forma que el volumen almacenado drenable total es

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3$$

Si la respuesta se hizo en función del volumen almacenado total, en vez de Sy en cada estrato, se ocupa la porosidad total.

Para estrato 1 (grava - arena):

$$\Delta h_2 = 100 \text{ m}$$

$$S_{g-a} = (0,16 + 100 \text{ m} \cdot 1 \times 10^{-5} \text{ 1/m}) = 0,161$$

$$V_3 = 0,161 \cdot 100 \text{ m} \cdot 24000 \text{ m} \cdot 6000 \text{ m} = 2.318,4 \text{ Mm}^3$$

De los 2318,4 Mm³, se tienen 2304 Mm³ por porosidad drenable y 14,4 Mm³ se deben al cambio de esa porosidad y de la densidad del agua por presión.

Para estrato 2 (roca fracturada):

$$b_{roca} = 50 \text{ m}$$

$$\Delta h_{roca} = 50 \text{ m}$$

$$\Delta h_2 = 100 \text{ m}$$

$$V_1 = 0,01 \cdot 50 \text{ m} \cdot 24000 \text{ m} \cdot 6000 \text{ m} = 7,2 \text{ Mm}^3$$

$$V_2 = 50 \text{ m} \cdot 1 \times 10^{-7} \text{ 1/m} \cdot 150 \text{ m} \cdot 24000 \text{ m} \cdot 6000 \text{ m} = 0,108 \text{ Mm}^3$$

$$V_{roca} = 7,31 \text{ Mm}^3$$

$$V_{\text{almacenado drenable total}} = 2.325,3 \text{ Mm}^3 \text{ aproximadamente}$$

$$5\% \text{ de } V_{\text{almacenado drenable total}} = 116 \text{ Mm}^3$$

$$\text{Extraccion} = 200 \text{ l/s} \cdot 86400 \text{ s / d} \cdot 1000 \text{ l/m}^3 \cdot 365 \text{ d/a} \cdot 20 \text{ a} = 126 \text{ Mm}^3$$

La extracción supera el 5% del volumen almacenado considerando parámetros conservadores para el análisis (los coeficientes de almacenamiento más bajos).

El volumen almacenado en el estrato de roca es poco relevante para el análisis, esto está determinado por la magnitud de la porosidad drenable de la roca en comparación a la del estrato de grava y arena.

¿Qué hubiese ocurrido si S_s del estrato grava-arena hubiese sido $1 \times 10^{-4} \text{ l/m}$? ¿Era este un valor razonable para S_s según el tipo de suelo?