

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023

1. (13 puntos)

En una sección transversal de un cauce se realizó una campaña de aforos, de la cual se obtuvo una serie de mediciones de nivel (H) y caudal (Q) cuyos resultados pueden verse en la Tabla 1.

Se pide:

Realizar un ajuste no lineal a las mediciones para obtener una curva de aforo, presentando como resultado el valor de los coeficientes A y b correspondientes a cada tramo. Considerar $H_0 = 0$ m y dividir los datos en dos tramos según se indica a continuación.

Tramo 1: $H < 5$ m

Tramo 2: $H \geq 5$ m

Recordar que la forma funcional para el ajuste es:

$$Q = A (H - H_0)^b$$

Tabla 1: Resultado de campaña de aforos.

H (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	Q (m ³ /s)
1.35	2.0	2.48	22.2	6.36	508
1.56	5.3	2.59	26.8	6.48	529
1.69	6.1	2.78	38.6	7.23	687
1.82	8.5	2.93	42.5	8.02	908
1.92	11.6	3.13	62.8	9.54	1437
1.97	12.3	3.62	105	11.88	2232
2.09	13.0	3.90	154		
2.20	15.6	5.45	388		

Solución:

H (m)	Q (m ³ /s)	H - H ₀ (m)	log (Q)	log(H-H ₀)	Q Curva (m ³ /s)
1.35	2.0	1.350	0.306	0.130	2.58
1.56	5.3	1.560	0.722	0.193	4.45
1.69	6.1	1.690	0.785	0.228	6.01
1.82	8.5	1.820	0.928	0.260	7.94
1.92	11.6	1.920	1.063	0.283	9.71
1.97	12.3	1.970	1.088	0.294	10.69
2.09	13.0	2.090	1.114	0.320	13.36
2.20	15.6	2.200	1.193	0.342	16.20
2.48	22.2	2.480	1.346	0.394	25.42
2.59	26.8	2.590	1.429	0.413	29.92
2.78	38.6	2.780	1.586	0.444	39.05
2.93	42.5	2.930	1.628	0.467	47.58
3.13	62.8	3.130	1.798	0.496	60.99
3.62	105	3.620	2.020	0.559	105.38
3.90	154	3.900	2.186	0.591	139.46
5.45	388	5.450	2.589	0.736	366.11
6.36	508	6.360	2.706	0.803	525.50

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023

6.48	529	6.480	2.724	0.812	549.00
7.23	687	7.230	2.837	0.859	709.41
8.02	908	8.020	2.958	0.904	904.30
9.54	1437	9.540	3.157	0.980	1357.47
11.88	2232	11.880	3.349	1.075	2268.38

Ajuste no lineal	
H0	0
Tramo 1	<5m
A	0.84
b	3.76
Tramo 2	
A	6.92
b	2.34

2. (12 puntos)

- Definir el concepto de "Servicios Ecosistémicos" y su clasificación promovida por la ONU.
- Para dos ecosistemas prevalentes en Uruguay: enumerar los servicios ecosistémicos, clasificándolos según la categorización realizada.

3. (12 puntos)

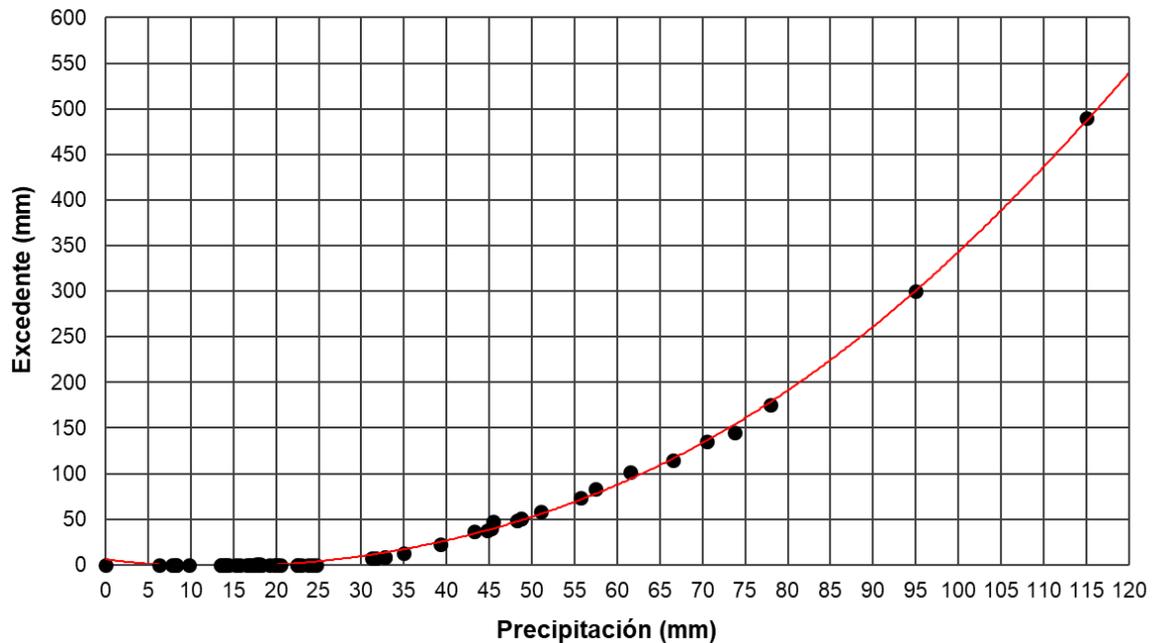
¿En qué consiste el análisis de sensibilidad de los parámetros de un modelo hidrológico? ¿Cuál es su utilidad?

4. (10 puntos)

En la siguiente figura se presentan valores medidos de precipitación mensual en función del excedente (T) obtenido empíricamente. A partir de dichos datos se pide estimar, aplicando la formulación de Temez, el valor del Agua Disponible de los suelos presentes en la cuenca. Asumir una condición de humedad antecedente (H_{i-1}) de 10 mm.

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023



Se recuerda que en el modelo de Temez se define un umbral (P_{oi}) que representa el volumen de agua precipitada a partir del cual existe escurrimiento, el cual se calcula como una fracción de la cantidad de agua que le falta a la capa superior del suelo (no saturada) para llenarse en el mes en cuestión.

Tabla 2: Valores de los parámetros regionalizados del modelo de Temez en Uruguay

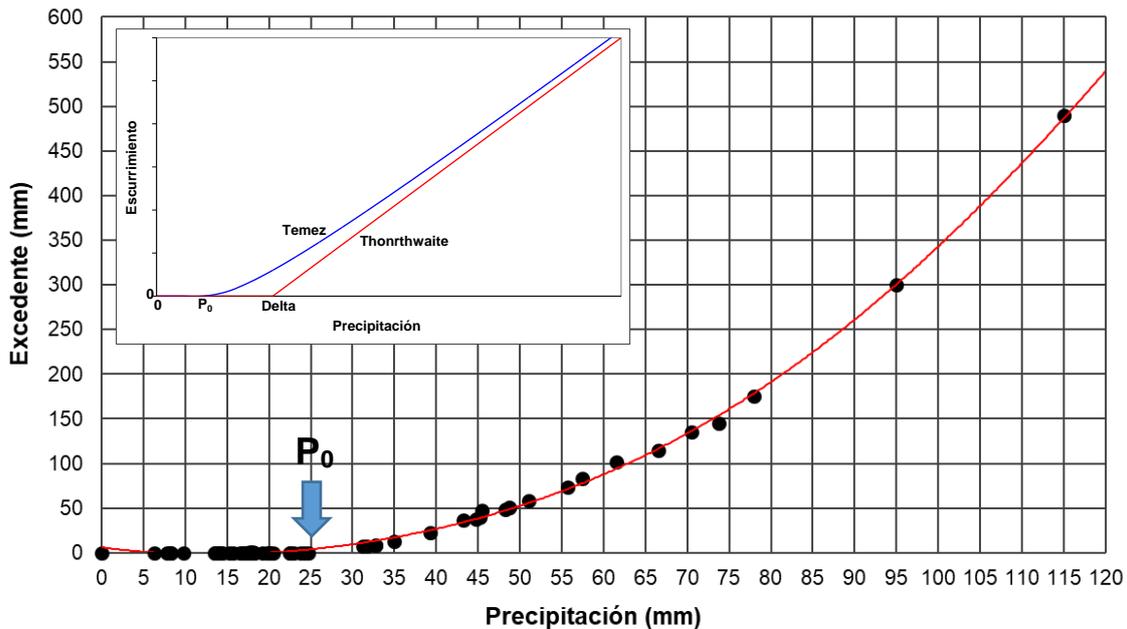
Parámetro	CAD	CPo	α (1/día)	$I_{\text{máx}}$ (mm)
Valor calibrado	0,92	0,30	0,0775	386

De la figura podemos estimar el valor de P_{oi} ($P_{oi} = 25$ mm), que representa el volumen de agua precipitada a partir del cual existe escurrimiento en ese mes:

$$T_i = 0 \quad \text{si } P_i \leq P_{oi}$$
$$T_i = \frac{(P_i - P_{oi})^2}{P_i + \delta_i - 2 P_{oi}} \quad \text{si } P_i > P_{oi}$$

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023



De la definición de la abstracción inicial de precipitación podemos despejar H_{max} :

$$P_{0i} = CP_0*(H_{max} - H_{i-1})$$

$$H_{max} = P_{0i}/CP_0 + H_{i-1}$$

$$H_{max} = 25/0,30 + 10 = 93 \text{ mm}$$

A su vez, de la definición de H_{max} , podemos despejar el AD empírico:

$$H_{max} = CAD*AD$$

$$AD = H_{max}/CAD = 93/0,92$$

$$AD = 101 \text{ mm}$$

5. (13 puntos)

De un registro incompleto y sesgado a eventos importantes de precipitación y mediante la distribución generalizada de extremos para máximos anuales se calcula la precipitación de período de retorno de 10 años en 100 mm y de 20 años en 112 mm. También se estima que el número medio anual de eventos de lluvia de magnitud suficiente para calibrar una Pareto Generalizada es 10.

- a) Calcular los parámetros de posición u y escala s de la Pareto asumiendo que el parámetro de forma es cero. Se recuerda que la expresión de la distribución de Pareto generalizada es la siguiente:

$$F(x) = Prob(X < x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{k}{s}(x - u)\right)^{-\frac{1}{k}} & \text{si } k \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x - u}{s}\right) & \text{si } k = 0 \end{cases}$$

- b) Calcular la lluvia de retorno de 30 años en función de la Pareto con los parámetros hallados en a).

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023

$$F(x) = Prob(X < x) = 1 - \frac{1}{v.Tr} = 1 - \exp\left(-\frac{x-u}{s}\right)$$

$$\ln(v.Tr_i) = \frac{x_i - u}{s}$$

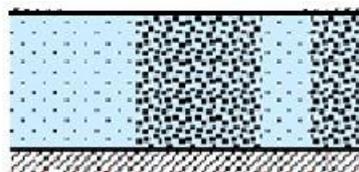
$$s = \frac{x_{20} - x_{10}}{\ln\left(\frac{Tr_1}{Tr_2}\right)} = \frac{12 \text{ mm}}{\ln(2)} \cong 17.3 \text{ mm}$$

$$u = 100 \text{ mm} - s \cdot \ln(100) = 112 \text{ mm} - s \cdot \ln(200) \cong 20.3 \text{ mm}$$

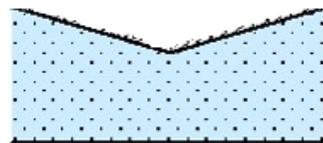
$$x(Tr = 30) = u + s \cdot \ln(300) \cong 119 \text{ mm}$$

6. (12 puntos)

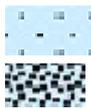
a) Determine y demuestre cómo es el gradiente hidráulico en cada sector del esquema si los materiales son como se indican en la figura. Dibuje un esquema del nivel piezométrico si el flujo va de izquierda a derecha y se trata de un acuífero confinado.



Esquema 1



Esquema 2



Material poco permeable

Material muy permeable

b) Defina qué significa que un acuífero sea homogéneo y qué significa que sea isótropo.

c) Defina cuáles deben ser las condiciones iniciales y condiciones de contorno para que la ecuación de flujo en medios porosos tenga solución.

Solución:

Parte a:

- Esquema 1:
 - $Q_1 = Q_2$, entonces, $K_1 i_1 A_1 = K_2 i_2 A_2$
 - Variación de gradiente al pasar de material poco permeable a material muy permeable: $K_1 < K_2$, entonces $i_1 > i_2$
 - Variación de gradiente al pasar de material muy permeable a material poco permeable: Si $K_1 > K_2$, entonces $i_1 < i_2$

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023

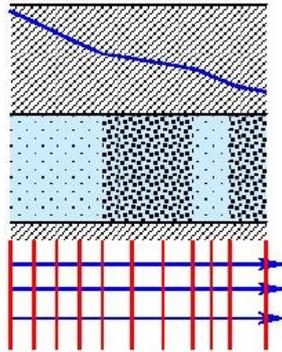


Figura 1: variación de gradiente hidráulico producto de cambios de la permeabilidad del acuífero.

- Esquema 2:

- $Q_1 = Q_2$, entonces $K i_1 A_1 = K i_2 A_2$. En este caso la permeabilidad del material es constante. Al disminuir el espesor cambia la sección por donde circula el flujo.
- Si aumenta el espesor: $A_1 < A_2$ entonces $i_1 > i_2$
- Si disminuye el espesor: $A_1 > A_2$ entonces $i_1 < i_2$
- Variación de gradiente al pasar de material muy permeable a material poco permeable: Si $K_1 > K_2$, entonces $i_1 < i_2$

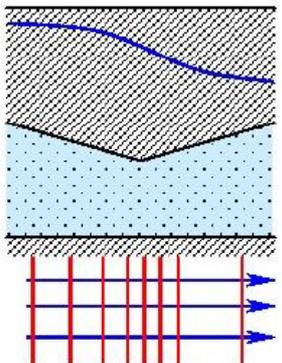


Figura 2: Variación de gradiente hidráulico producto del cambio de espesor en un acuífero cautivo.

Parte b:

- Homogéneo: cuando la conductividad hidráulica (K_x, K_y, K_z) es constante en todos sus puntos.
- Un medio es isotrópico cuando la conductividad hidráulica ($K_x = K_y = K_z$) es constante en todas las direcciones

Parte c:

Ecuación de flujo en medios porosos en estado transitorio para un medio saturado y anisótropo:

$$S_s \frac{dh}{dt} = \frac{d}{dx} \left(k_x \frac{dh}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k_y \frac{dh}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(k_z \frac{dh}{dz} \right)$$

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023

Las ecuaciones diferenciales obtenidas tienen infinitas soluciones, cada una de las cuales corresponde a un caso particular de flujo en el acuífero.

Para que un problema quede completamente definido y la ecuación diferencial que lo describe tenga una única solución, es necesario asociar a la misma las condiciones inicial y de contorno

Condiciones iniciales: Es la función $f(x,y,z,0)$ que indica la distribución de la carga piezométrica en el dominio de control en el instante inicial.

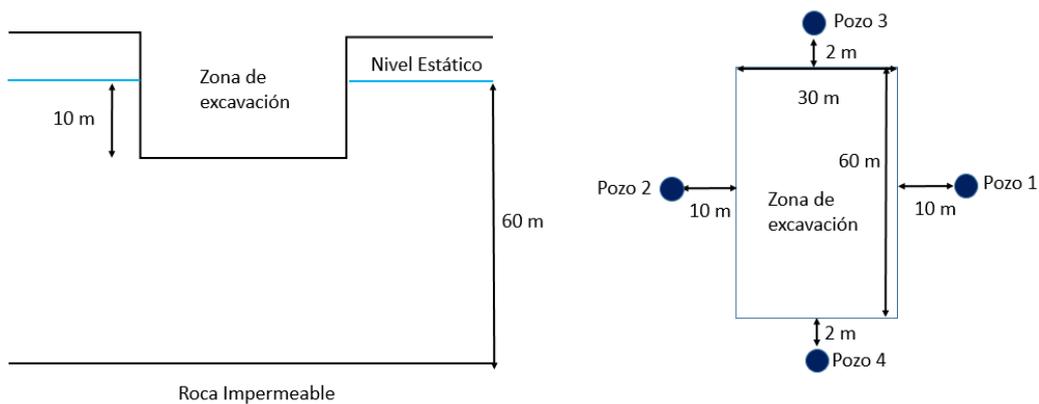
Condiciones de contorno: Las condiciones de contorno imponen valores específicos a la solución de ecuación general de flujo en la frontera del dominio (h conocido, condición de DIRICHLET) y al valor de la derivada normal a la frontera (flujo conocido, condición de NEWMAN).

7. (28 puntos)

Para la construcción de un edificio se necesita deprimir el nivel freático por debajo del nivel donde se proyecta construir las fundaciones, para lo cual se necesita diseñar un campo de bombeo, el cual estará operando de forma permanente durante la duración de las obras.

Para esto, se construyeron dos perforaciones y se realizó una prueba de bombeo en régimen transitorio. En ambas perforaciones se identificó un perfil sedimentario previo al contacto con el basamento cristalino.

La prueba de bombeo se realizó en el Pozo 1 con un caudal de bombeo de $65 \text{ m}^3/\text{h}$. En la Tabla 3 se presenta la información de la prueba de bombeo realizada, donde los descensos se midieron en el Pozo 2.



EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023

Tabla 3: Descensos medidos en Pozo 2.

t (min)	s (m)
1	1.8
3	2.5
6	3.3
10	3.8
20	4.5
40	5.3
70	5.9
100	6.3
200	7.1
400	7.9
700	8.5
1000	9.0
2000	9.3
3000	9.4
4320	9.5

- 1) Determinar el tipo de acuífero y los parámetros hidrogeológicos del mismo. (10 puntos)
- 2) Para el escenario de operación del campo de bombeo se pide determinar el caudal de bombeo para distintas configuraciones de pozos en operación. Para este escenario puede suponerse un radio de influencia de 300 m.
 - a) El caudal necesario que se requiere bombear en cada pozo si se utiliza el Pozo 1 y Pozo 2 en conjunto. (6 puntos)
 - b) El caudal necesario que se requiere bombear en cada pozo si se utiliza el Pozo 3 y Pozo 4 en conjunto. (6 puntos)
 - c) El caudal necesario que se requiere bombear en cada pozo si se utilizan los cuatro pozos en simultáneo. (6 puntos)

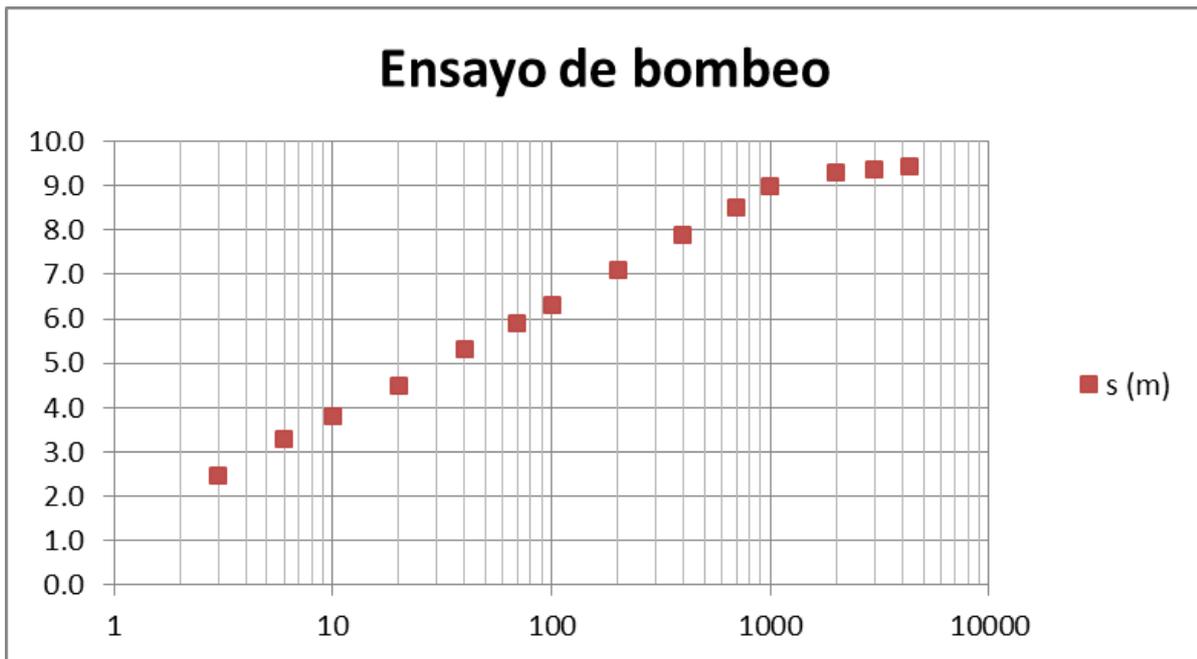
Solución:

Parte 1:

Se grafican los descensos vs el tiempo en hoja semilogarítmica, obteniéndose el siguiente gráfico:

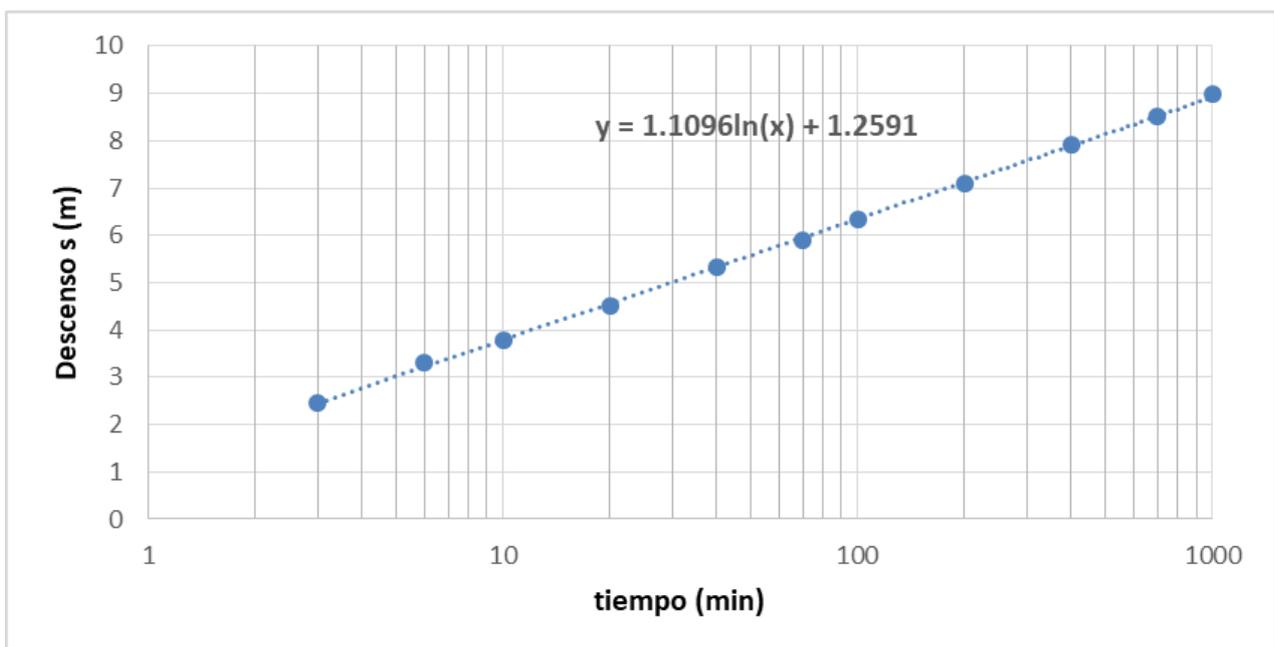
EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023



Se utiliza la fórmula de aproximación de Jacob para calcular los parámetros hidrogeológicos.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln(t) + \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2,25T}{r^2 S}\right)$$



Se obtienen los siguientes valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero:

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023

	Jacobs
m	1.1
To (m ² /min)	0.0784
To (m ² /dia)	112.86
To (m ² /h)	4.70
n	1.26
S	2.24E-05

Se trata de un acuífero cautivo por el orden del coeficiente de almacenamiento. Para estos parámetros se verifica la validez de Jacobs, corroborando $u < 0,03$.

t (min)	s (m)	u < 0,03
1	1.8	0.17891961
3	2.5	0.05963987
6	3.3	0.02981993
10	3.8	0.01789196
20	4.5	0.00894598
40	5.3	0.00447299
70	5.9	0.00255599
100	6.3	0.0017892
200	7.1	0.0008946
400	7.9	0.0004473
700	8.5	0.0002556
1000	9.0	0.00017892
2000	9.3	8.946E-05
3000	9.4	5.964E-05
4320	9.5	4.1417E-05

Parte 2a:

Se utiliza la formulación de acuífero cautivo en estado estacionario y se consideran los descenso producidos por el Pozo 1 y Pozo 2 en el Punto A.

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln(R/r)$$

EXAMEN de DISEÑO HIDROLÓGICO

Julio 2023

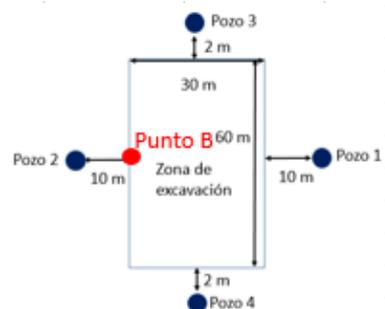
Parte 2a	
Estado Estacionario	
r pozo (m)	0.128
Q maximo (m ³ /h)	73
Radio Influencia (m)	300
Distancia Punto A (m)	39.1
s Pozo 1 en A (m)	5.0
s Pozo 2 en A (m)	5.0
S total (m)	10.1



Parte 2b:

Se utiliza la formulación de acuífero cautivo en estado estacionario y se consideran los descensos producidos por el Pozo 3 y Pozo 4 en el Punto B.

Parte 2b	
Estado Estacionario	
r pozo (m)	0.128
Q maximo (m ³ /h)	70
Radio Influencia (m)	300
Distancia Punto A (m)	35.3
s Pozo 3 en B (m)	5.1
s Pozo 4 en B (m)	5.1
S total (m)	10.1



Parte 2c:

Se utiliza la formulación de acuífero cautivo en estado estacionario y se consideran los descensos producidos por los cuatro pozos en el punto D.

Parte 2c	
Estado Estacionario	
r pozo (m)	0.128
Q maximo (m ³ /h)	35
Radio Influencia (m)	300
Distancia Pozo 1 a Punto D (m)	50.0
Distancia Pozo 2 a Punto D (m)	31.6
Distancia Pozo 3 a Punto D (m)	15.1
Distancia Pozo 4 a Punto D (m)	63.8
s Pozo 1 en D (m)	2.1
s Pozo 2 en D (m)	2.7
s Pozo 3 en D (m)	3.5
s Pozo 3 en D (m)	1.8
S total (m)	10.2

