

Hidrogeología: Propiedades de los Acuíferos

Oscar García-Cabrejo

Escuela de Ingeniería Geológica
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia



Contenido

Acuíferos

Definición

Partes de un Acuífero

Contenido

Acuíferos

Definición

Partes de un Acuífero

Potencial de Fluido

Contenido

Acuíferos

Definición

Partes de un Acuífero

Potencial de Fluido

Ley de D'arcy

Contenido

Acuíferos

Definición

Partes de un Acuífero

Potencial de Fluido

Ley de D'arcy

Propiedades

Conductividad Hidráulica

Compresibilidad

Coeficiente de Almacenamiento



Acuíferos

Definición

Unidad Geológica (UG), parte de una UG, o grupo de UG que permiten el almacenamiento y movimiento de agua y de la(s) cual(es) es posible extraer agua de forma económica. (Definición similar a la de reserva.)

Partes de un Acuífero

Partes

- Capa Acuífera

Partes de un Acuífero

Partes

- ▶ Capa Acuífera
- ▶ Capa Confinante

Partes de un Acuífero

Partes

- ▶ Capa Acuífera
- ▶ Capa Confinante
- ▶ Zona de Recarga

Partes de un Acuífero

Partes

- ▶ Capa Acuífera
- ▶ Capa Confinante
- ▶ Zona de Recarga
- ▶ Zona de Descarga

Partes de un Acuífero

Capa(s) Acuífera

- ▶ Capa(s) o litología(s) que permite almacenamiento y movimiento de agua.

Partes de un Acuífero

Capa(s) Acuífera

- ▶ Capa(s) o litología(s) que permite almacenamiento y movimiento de agua.
- ▶ **Almacenamiento**: Porosidad (primaria, secundaria, terciaria) y configuración geológica.

Partes de un Acuífero

Capa(s) Acuífera

- ▶ Capa(s) o litología(s) que permite almacenamiento y movimiento de agua.
- ▶ **Almacenamiento:** Porosidad (primaria, secundaria, terciaria) y configuración geológica.
- ▶ **Flujo de Agua:** Conductividad hidráulica, configuración geológica



Partes de un Acuífero

Capa(s) Confinante(s)

- ▶ Capa(s) o litología(s) que no permiten el movimiento de agua

Partes de un Acuífero

Capa(s) Confinante(s)

- ▶ Capa(s) o litología(s) que no permiten el movimiento de agua
- ▶ Permiten **alma-cenamiento**

Partes de un Acuífero

Capa(s) Confinante(s)

- ▶ Capa(s) o litología(s) que no permiten el movimiento de agua
- ▶ Permiten **alma-cenamiento**
- ▶ Capa Confinante de Flujo Bajo (Capa Semiconfinante):
Permite flujo parcial de agua

Partes de un Acuífero

Capa(s) Confinante(s)

- ▶ Capa(s) o litología(s) que no permiten el movimiento de agua
- ▶ Permiten **alma-cenamiento**
- ▶ Capa Confinante de Flujo Bajo (Capa Semiconfinante): Permite flujo parcial de agua
- ▶ Sello superior e inferior de acuífero



Partes de un Acuífero

Zonas de Recarga

- ▶ Áreas de la cuenca hidrográfica que permiten la infiltración de agua

Partes de un Acuífero

Zonas de Recarga

- ▶ Áreas de la cuenca hidrográfica que permiten la infiltración de agua
- ▶ Infiltración depende del tipo y uso del suelo

Partes de un Acuífero

Zonas de Recarga

- ▶ Áreas de la cuenca hidrográfica que permiten la infiltración de agua
- ▶ Infiltración depende del tipo y uso del suelo
- ▶ Identificada durante etapa del balance hídrico (geología de campo, mapa de tipo y uso de suelos)



Partes de un Acuífero

Zonas de Descarga

- ▶ Áreas de la cuenca hidrográfica donde la(s) capa(s) acuífera(s) aportan/extran agua de las corrientes superficiales

Partes de un Acuífero

Zonas de Descarga

- ▶ Áreas de la cuenca hidrográfica donde la(s) capa(s) acuífera(s) aportan/extran agua de las corrientes superficiales
- ▶ **Zona Descarga:** durante verano

Partes de un Acuífero

Zonas de Descarga

- ▶ Áreas de la cuenca hidrográfica donde la(s) capa(s) acuífera(s) aportan/extran agua de las corrientes superficiales
- ▶ **Zona Descarga:** durante verano
- ▶ **Zona descarga** se convierte en zona de recarga durante invierno



Partes de un Acuífero

Zonas de Descarga

- ▶ Áreas de la cuenca hidrográfica donde la(s) capa(s) acuífera(s) aportan/extran agua de las corrientes superficiales
- ▶ **Zona Descarga:** durante verano
- ▶ **Zona descarga** se convierte en zona de recarga durante invierno

- ▶ **Zonas de Descarga**
Puntuales **Manantiales**



Potencial: Definición

- **Procesos físicos que involucran flujo:** Flujo de agua, flujo eléctrico-magnético, flujo de calor

Potencial: Definición

- ▶ **Procesos físicos que involucran flujo:** Flujo de agua, flujo eléctrico-magnético, flujo de calor
- ▶ **Común Denominador:** Movimiento ocurre de zonas de alta a baja T, alto a bajo Voltaje

Potencial: Definición

- ▶ **Procesos físicos que involucran flujo:** Flujo de agua, flujo eléctrico-magnético, flujo de calor
- ▶ **Común Denominador:** Movimiento ocurre de zonas de alta a baja T, alto a bajo Voltaje
- ▶ Funciones Potenciales

Potencial: Definición

- ▶ **Procesos físicos que involucran flujo:** Flujo de agua, flujo eléctrico-magnético, flujo de calor
- ▶ **Común Denominador:** Movimiento ocurre de zonas de alta a baja T, alto a bajo Voltaje
- ▶ Funciones Potenciales
- ▶ **Flujo de Agua:** Potencial de Fluido definido por Hubbert 1940

Potencial de Hubbert

Definición

Potencial se define como una *cantidad física que se puede medir en cada punto de un sistema de flujo, que tiene la propiedad que el flujo siempre ocurre de las regiones de potencial alto a las regiones de potencial bajo sin importar la dirección en el espacio.*

Potencial de Hubbert

Definición

Potencial se define como una *cantidad física que se puede medir en cada punto de un sistema de flujo, que tiene la propiedad que el flujo siempre ocurre de las regiones de potencial alto a las regiones de potencial bajo sin importar la dirección en el espacio.*

Ejemplos

- ▶ Experimento de Darcy: Cabeza hidráulica (Requiere análisis)

Potencial de Hubbert

Definición

Potencial se define como una *cantidad física que se puede medir en cada punto de un sistema de flujo, que tiene la propiedad que el flujo siempre ocurre de las regiones de potencial alto a las regiones de potencial bajo sin importar la dirección en el espacio.*

Ejemplos

- ▶ Experimento de Darcy: Cabeza hidráulica (Requiere análisis)
- ▶ Elevación

Potencial de Hubbert

Definición

Potencial se define como una *cantidad física que se puede medir en cada punto de un sistema de flujo, que tiene la propiedad que el flujo siempre ocurre de las regiones de potencial alto a las regiones de potencial bajo sin importar la dirección en el espacio.*

Ejemplos

- ▶ Experimento de Darcy: Cabeza hidráulica (Requiere análisis)
- ▶ Elevación
- ▶ Presión de fluido



Potencial de Hubbert

En busca del Potencial ...

- Casos

Potencial de Hubbert

En busca del Potencial . . .

- ▶ Casos
- ▶ Función Potencial: Debería incluir cabeza y gravedad

Potencial de Hubbert

En busca del Potencial . . .

- ▶ Casos
- ▶ Función Potencial: Debería incluir cabeza y gravedad
- ▶ **Mejor Forma:** Ecuación de energía

Potencial de Hubbert

En busca del Potencial ...

- ▶ Casos
- ▶ Función Potencial: Debería incluir cabeza y gravedad
- ▶ **Mejor Forma**: Ecuación de energía

Ecuación de Bernoulli

La energía en dos puntos sobre una línea de flujo deben cumplir:

$$\underbrace{\text{Energía}}_{\text{Punto 1}} = \underbrace{\text{Energía} + \text{Pérdidas}}_{\text{Punto 2}} \quad (1)$$



Potencial de Hubbert

Ecuación de Bernoulli

Energía en un fluido está representada por:

- ▶ Energía potencial (por estar presente en un campo gravitatorio)

Potencial de Hubbert

Ecuación de Bernoulli

Energía en un fluido está representada por:

- ▶ Energía potencial (por estar presente en un campo gravitatorio)
- ▶ Energía de-presión (debida a la columna de agua)

Potencial de Hubbert

Ecuación de Bernoulli

Energía en un fluido está representada por:

- ▶ Energía potencial (por estar presente en un campo gravitatorio)
- ▶ Energía de-presión (debida a la columna de agua)
- ▶ Energía cinética (por estar en movimiento)

Potencial de Hubbert

Ecuación de Bernoulli

Energía en un fluido está representada por:

- ▶ Energía potencial (por estar presente en un campo gravitatorio)
- ▶ Energía de-presión (debida a la columna de agua)
- ▶ Energía cinética (por estar en movimiento)
- ▶ Energía Interna (disponible para reacciones químicas)

Energía Potencial

Energía que tiene un cuerpo por estar a una altura z en un campo gravitacional:

$$E_{\text{Pot}} = F \cdot d = mg \cdot z$$



Potencial de Hubbert

Energía de-Presión

Energía que tiene un fluido debido a la acción de la columna de agua suprayacente:

$$E_{\text{Pre}} = P \cdot V = \rho g h_{\text{Col H}_2\text{O}} \cdot V = m g h_{\text{Col H}_2\text{O}} \quad (3)$$

Potencial de Hubbert

Energía de-Presión

Energía que tiene un fluido debido a la acción de la columna de agua suprayacente:

$$E_{\text{Pre}} = P \cdot V = \rho g h_{\text{Col H}_2\text{O}} \cdot V = m g h_{\text{Col H}_2\text{O}} \quad (3)$$

Energía Cinética

La energía que tiene un fluido por encontrarse en movimiento:

$$E_{\text{Cin}} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4)$$



Potencial de Hubbert

Energía Interna

Energía que posee un fluido para la ocurrencia de reacciones químicas:

$$U = H - W \quad (5)$$

donde U es la energía interna, Q es el calor agregado al sistema y W es el trabajo realizado por el sistema.

Potencial de Hubbert

Energía Interna

Energía que posee un fluido para la ocurrencia de reacciones químicas:

$$U = H - W \quad (5)$$

donde U es la energía interna, Q es el calor agregado al sistema y W es el trabajo realizado por el sistema.

Pregunta

Cuáles tipos de Energía son importantes?

Potencial de Hubbert

Energía Total

Suma de 4 componentes:

$$\underbrace{\text{Energía Total}}_{\text{Punto 1}} = \underbrace{\text{Energía Total} + \text{Pérdidas}}_{\text{Punto 2}} \quad (6)$$

La cual se convierte en:

$$mgz_1 + mgh_{\text{Col H}_2\text{O},1} + \frac{1}{2}mv_1^2 + U_1 =$$

$$mgz_2 + mgh_{\text{Col H}_2\text{O},2} + \frac{1}{2}mv_2^2 + U_2 + \text{Pérdidas} \quad (7)$$

Potencial de Hubbert

Energía Total - Incompleta

Sabiendo que la velocidad v del agua subterránea es baja, y que para el caso de acuíferos de agua dulce las reacciones químicas no liberan grandes cantidades de energía:

$$mgz_1 + mgh_{\text{Col H}_2\text{O},1} = mgz_2 + mgh_{\text{Col H}_2\text{O},2} + \text{Pérdidas} \quad (8)$$

Potencial de Hubbert

Energía Total - Incompleta

Sabiendo que la velocidad v del agua subterránea es baja, y que para el caso de acuíferos de agua dulce las reacciones químicas no liberan grandes cantidades de energía:

$$mgz_1 + mgh_{\text{Col H}_2\text{O},1} = mgz_2 + mgh_{\text{Col H}_2\text{O},2} + \text{Pérdidas} \quad (8)$$

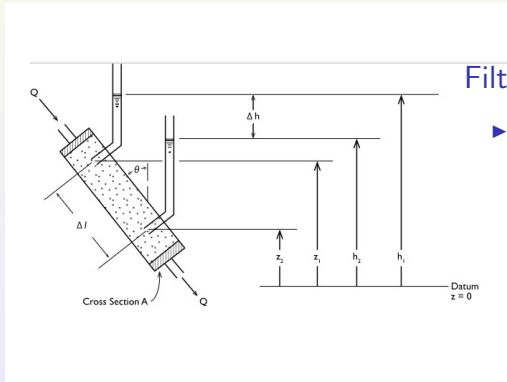
y si calculamos la energía total (incompleta) por unidad de masa se tiene:

$$gz_1 + gh_{\text{Col H}_2\text{O},1} = gz_2 + gh_{\text{Col H}_2\text{O},2} + \text{Pérdidas} \quad (9)$$

la variable $g(z_1 + h_{\text{Col H}_2\text{O},1})$ se denomina **Potencial de Fluido**.
variable $z_1 + h_{\text{Col H}_2\text{O},1}$ se denomina **Nivel Piezométrico**.



Ley de D'arcy

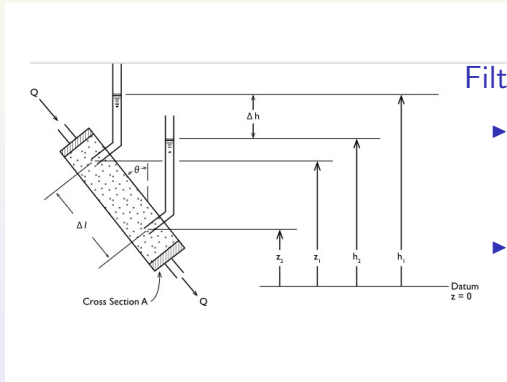


Filtros

- 1856 Henry D'arcy realizó experimentos para diseñar filtros en Dijon (Francia)

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Ley de D'arcy

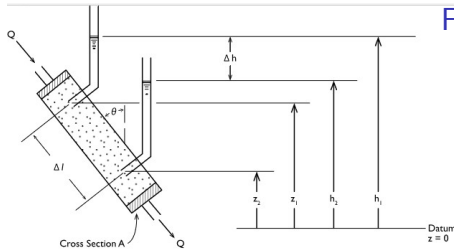


Filtros

- ▶ 1856 Henry D'arcy realizó experimentos para diseñar filtros en Dijon (Francia)
- ▶ Experimento de Laboratorio

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Ley de D'arcy



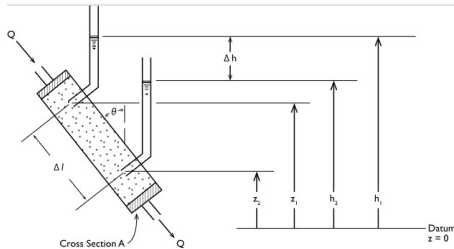
Filtros

- ▶ 1856 Henry D'arcy realizó experimentos para diseñar filtros en Dijon (Francia)
- ▶ Experimento de Laboratorio
- ▶ Resultados Empíricos → Ecuación sencilla

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

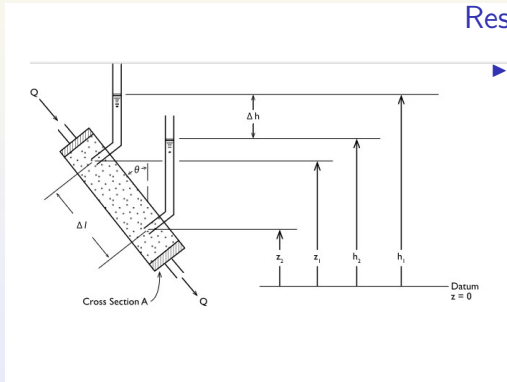
Ley de D'arcy

Experimento



- ▶ Q : Caudal de Entrada (= salida)
- ▶ A : Sección transversal
- ▶ z : Elevación sobre datum arbitrario
- ▶ h : Nivel de agua
- ▶ Δl : distancia horizontal entre piezómetros

Ley de D'arcy

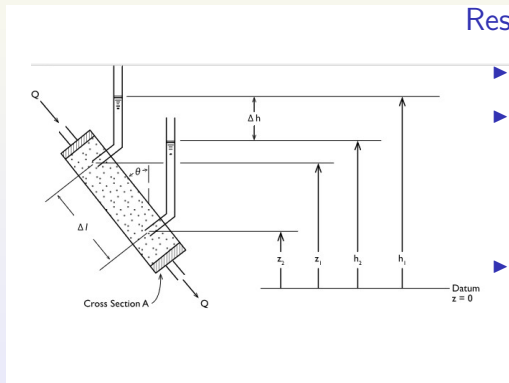


Resultados

► $Q \sim \Delta h$, $Q \sim 1/\Delta l$, $Q \sim A$

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Ley de D'arcy



Resultados

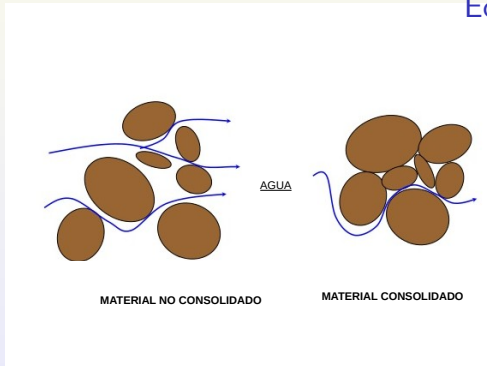
- ▶ $Q \sim \Delta h$, $Q \sim 1/\Delta l$, $Q \sim A$
- ▶ Ley empírica

$$Q \sim \frac{A\Delta h}{\Delta l} \quad (10)$$

- ▶ Ecuación:

$$Q = -K \frac{A\Delta h}{\Delta l} = -KA \frac{dh}{dl} \quad (11)$$

Ley de D'arcy

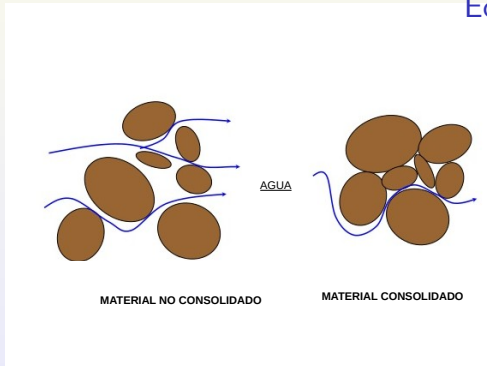


Ecuación

- **Conductividad Hidráulica**
Constante de proporcionalidad K depende de material y fluido

Fuente: Autor

Ley de D'arcy

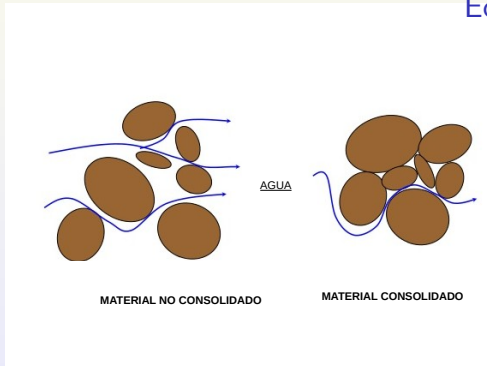


Ecuación

- ▶ **Conductividad Hidráulica**
Constante de proporcionalidad K depende de material y fluido
- ▶ **Gradiente Hidráulico:**
 $I = dh/dl$

Fuente: Autor

Ley de D'arcy

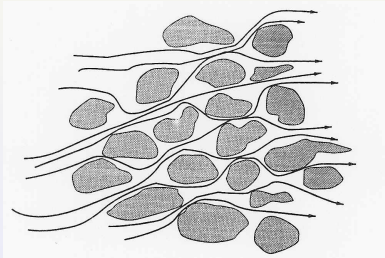


Ecuación

- ▶ **Conductividad Hidráulica**
Constante de proporcionalidad K depende de material y fluido
- ▶ **Gradiente Hidráulico:**
 $I = dh/dl$
- ▶ Forma alternativa:

$$Q = -KA I \quad (12)$$

Ley de D'arcy

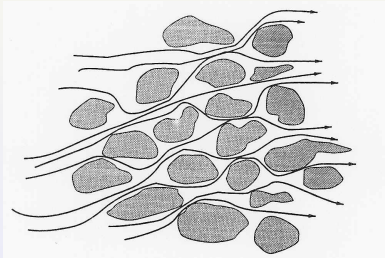


2 Velocidades

- ▶ Se pueden definir 2 velocidades



Ley de D'arcy



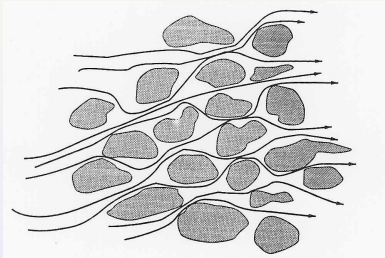
2 Velocidades

- ▶ Se pueden definir 2 velocidades
- ▶ Descarga(Caudal) Específica

$$v = \frac{Q}{A} \quad (13)$$



Ley de D'arcy



2 Velocidades

- ▶ Se pueden definir 2 velocidades
- ▶ Descarga(Caudal) Específica

$$v = \frac{Q}{A} \quad (13)$$

- ▶ VELOCIDAD APARENTE


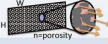
Ley de D'arcy

2 Velocidades


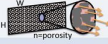
► Velocidad Real

$$v_R = \frac{Q}{A\phi} \quad (14)$$

donde ϕ = porosidad

	Darcy Velocity (Equation 1) (also called Specific Discharge)	Seepage Velocity (Equation 2) (also called Interstitial Velocity)
Description	Darcy velocity is averaged over entire transect area	Seepage velocity is velocity in open pore space
Diagram		
Area Used for any Flow Calculation	Use entire transect area: $Area = W \cdot H$	Use only open porosity area: $Area = W \cdot H \cdot n$
Flow Calculation	$(K \cdot i) = \text{Darcy Velocity } (q)$ $Flow = K \cdot i \cdot W \cdot H$	$\left(\frac{K \cdot i}{n}\right) = \text{Seepage Velocity } (V_s)$ $Flow = \left(\frac{K \cdot i}{n}\right) \cdot W \cdot H \cdot n$
	$Flow = K \cdot i \cdot W \cdot H$	$Flow = K \cdot i \cdot W \cdot H \cdot n$

Ley de D'arcy

	Darcy Velocity (Equation 1) (also called Specific Discharge)	Seepage Velocity (Equation 2) (also called Interstitial Velocity)
Description	Darcy velocity is averaged over entire transect area	Seepage velocity is velocity in open pore space
Diagram		
Area Used for any Flow Calculation	Use entire transect area: $Area = W \cdot H$	Use only open porosity area: $Area = W \cdot H \cdot n$
Flow Calculation	$(K \cdot i) = \text{Darcy Velocity } (q)$ $Flow = K \cdot i \cdot W \cdot H$	$(\frac{K \cdot i}{n}) = \text{Seepage Velocity } (V_s)$ $Flow = \frac{K \cdot i}{n} \cdot W \cdot H \cdot n$
	$Flow = K \cdot i \cdot W \cdot H$	$Flow = K \cdot i \cdot W \cdot H \cdot n$

2 Velocidades

► Velocidad Real

$$v_R = \frac{Q}{A\phi} \quad (14)$$

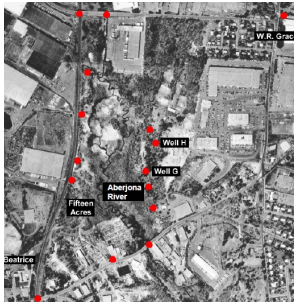
donde ϕ = porosidad

► $A\phi$: Área efectiva de flujo

Ley de D'arcy

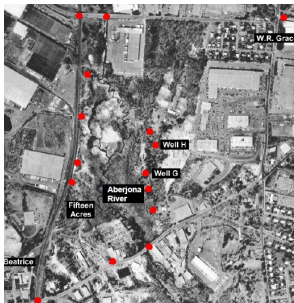
TV y Novelas Hidrogeológico

- ▶ George Pinder: Profesor Hidrogeología Universidad de Princeton USA



Fuente: Profesor Google

Ley de D'arcy



Fuente: Profesor Google

TV y Novelas Hidrogeológico

- ▶ George Pinder: Profesor Hidrogeología Universidad de Princeton USA
- ▶ Caso de Woburn, MA 1982: Efectos en la salud (leucemia, arritmias cardíacas, problemas inmunológicos y neurológicos) por posible contaminación del agua de pozo.

Ley de D'arcy



www.georgepinder.com

TV y Novelas Hidrogeológico

- ▶ Juicio con testimonio experto de George Pinder (trabajó para los buenos)

Ley de D'arcy



www.georgepinder.com

TV y Novelas Hidrogeológico

- ▶ Juicio con testimonio experto de George Pinder (trabajó para los **buenos**)
- ▶ George Pinder en audiencia: Velocidad del agua subterránea es:

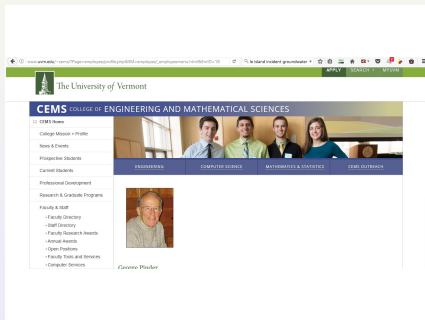
$$v = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

Ley de D'arcy

TV y Novelas Hidrogeológico

- ▶ Los malos sabían que

$$v_R = \frac{Q}{A\phi} \quad (16)$$



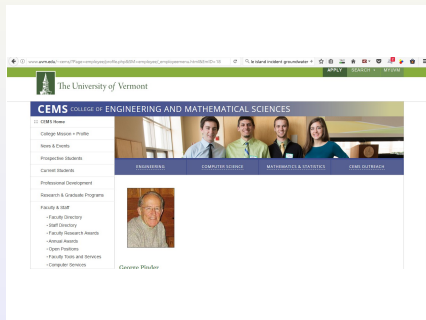
Ley de D'arcy

TV y Novelas Hidrogeológico

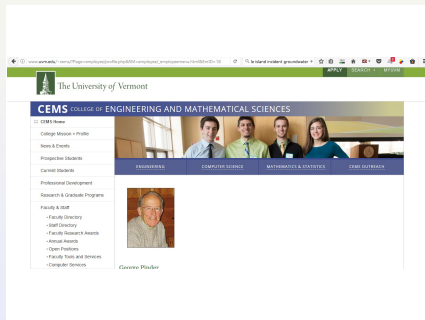
- ▶ Los malos sabían que

$$v_R = \frac{Q}{A\phi} \quad (16)$$

- ▶ **Resultado:** Los buenos perdieron el juicio



Ley de D'arcy



TV y Novelas Hidrogeológico

- ▶ Los malos sabían que

$$v_R = \frac{Q}{A\phi} \quad (16)$$

- ▶ **Resultado:** Los buenos perdieron el juicio
- ▶ George Pinder despedido de la Universidad.

Propiedades de un Acuífero



Six, Six, Six, the number of the Beast

- Hay 7 pecados capitales, pero . . .

Fuente: la famosa wikipedia

Propiedades de un Acuífero



Fuente: la famosa wikipedia

Six, Six, Six, the number of the Beast

- ▶ Hay 7 pecados capitales, pero ...
- ▶ Solo hay 6 propiedades de un acuífero ...

Propiedades de un Acuífero

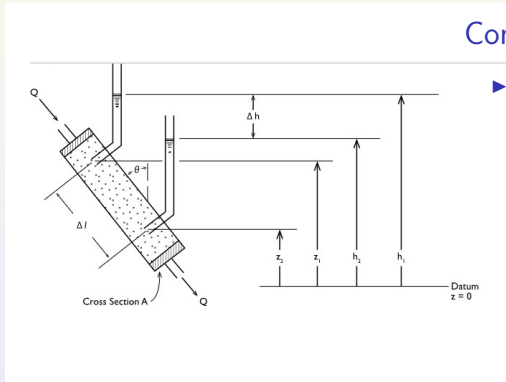


Fuente: la famosa wikipedia

Six, Six, Six, the number of the Beast

- ▶ Hay 7 pecados capitales, pero ...
- ▶ Solo hay 6 propiedades de un acuífero ...
- ▶ Que uds necesitan saber para salvarse en este curso

Conductividad Hidráulica

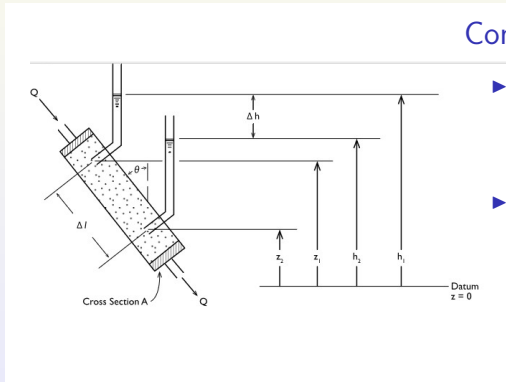


Conductividad Hidráulica

- ▶ Constante de proporcionalidad K depende del material y fluido

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Conductividad Hidráulica

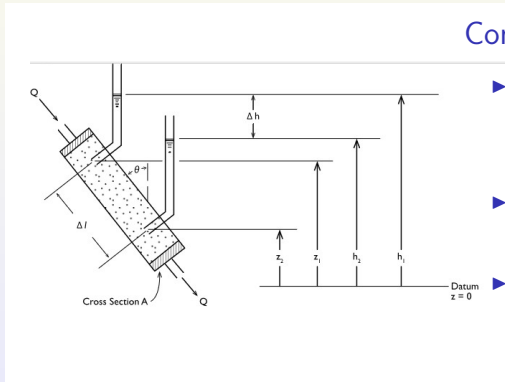


Conductividad Hidráulica

- ▶ Constante de proporcionalidad K depende del material y fluido
- ▶ Considere experimento de D'arcy con agua y miel

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Conductividad Hidráulica

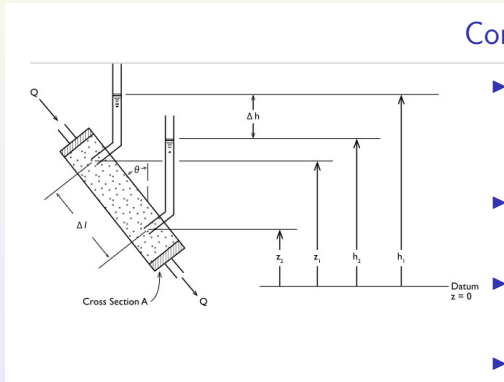


Conductividad Hidráulica

- ▶ Constante de proporcionalidad K depende del material y fluido
- ▶ Considere experimento de D'arcy con agua y miel
- ▶ Mantenga Δl y Δh constantes

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Conductividad Hidráulica

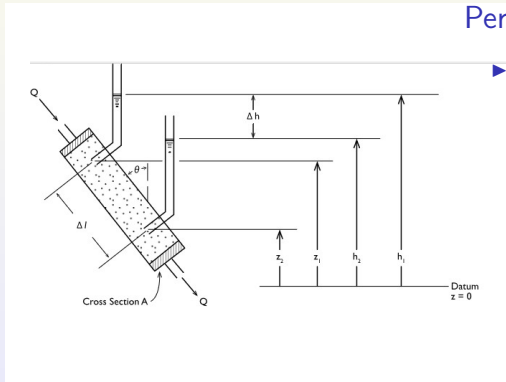


Conductividad Hidráulica

- ▶ Constante de proporcionalidad K depende del material y fluido
- ▶ Considere experimento de D'arcy con agua y miel
- ▶ Mantenga Δl y Δh constantes
- ▶ $Q_{\text{Agua}} > Q_{\text{Miel}}$

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Conductividad Hidráulica

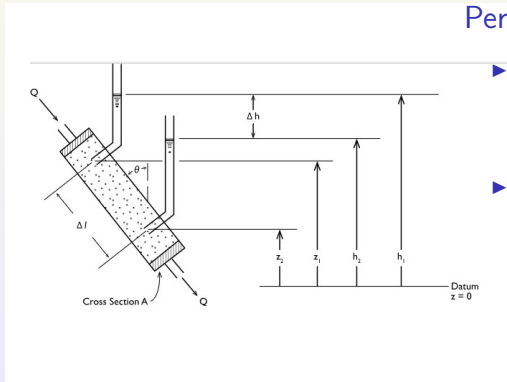


Permeabilidad

- Propiedad intrínseca del medio para permitir flujo de cualquier fluido

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Conductividad Hidráulica

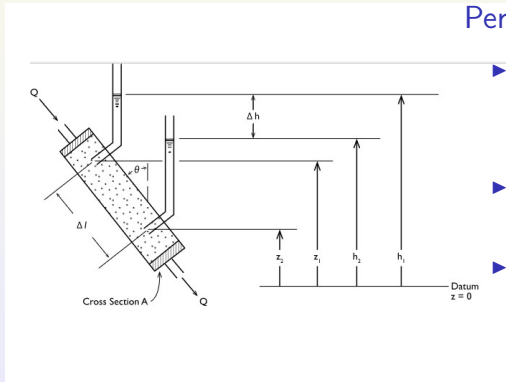


Permeabilidad

- Propiedad intrínseca del medio para permitir flujo de cualquier fluido
- **Experimentos:** $Q \sim d^2$,
 $Q \sim \rho g$, $Q \sim 1/\mu$

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Conductividad Hidráulica



Permeabilidad

- Propiedad intrínseca del medio para permitir flujo de cualquier fluido
- **Experimentos:** $Q \sim d^2$,
 $Q \sim \rho g$, $Q \sim 1/\mu$
- Ley de D'arcy:

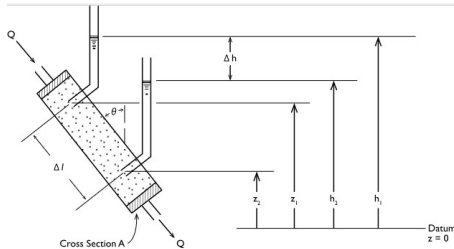
$$Q = -\frac{Cd^2 \rho g}{\mu} \frac{dh}{dl} \quad (17)$$

Conductividad Hidráulica

Permeabilidad

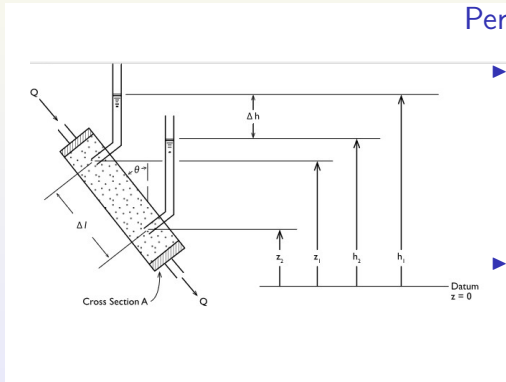
► De la Ley de D'arcy:

$$K = \frac{Cd^2\rho g}{\mu} \quad (18)$$



Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Conductividad Hidráulica



Permeabilidad

- ▶ De la Ley de D'arcy:

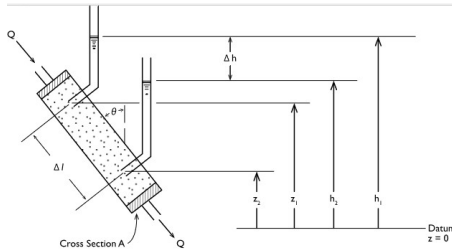
$$K = \frac{Cd^2\rho g}{\mu} \quad (18)$$

- ▶ Propiedad del medio poroso (Permeabilidad) $k = Cd^2$

Fuente: <http://hydrogeologistswithoutborders.org>

Conductividad Hidráulica

Permeabilidad

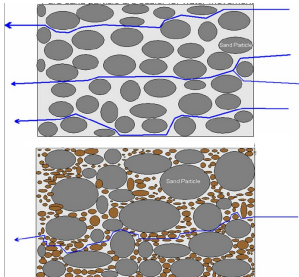


- ▶ De la Ley de D'arcy:

$$K = \frac{Cd^2\rho g}{\mu} \quad (18)$$

- ▶ Propiedad del medio poroso (Permeabilidad) $k = Cd^2$
- ▶ Propiedad del fluido: viscosidad dinámica μ/ρ

Conductividad Hidráulica



Conductividad Hidráulica

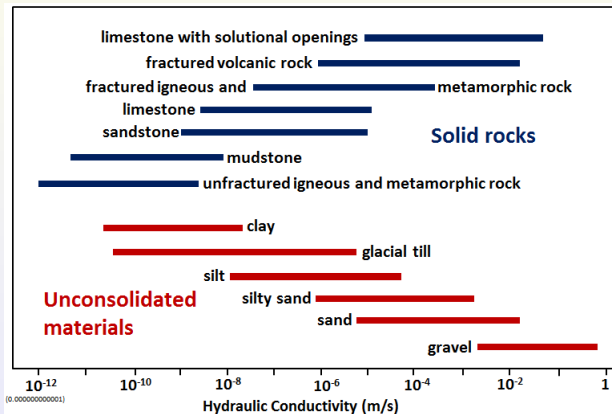
- La conductividad hidráulica está definida como:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (19)$$

Fuente: Prof. Google

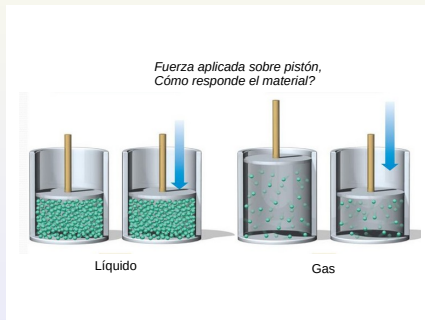
(<https://www.researchgate.net/publication/25767296>)

Conductividad Hidráulica



Fuente: Profesor Google (<https://opentextbc.ca>)

Compresibilidad

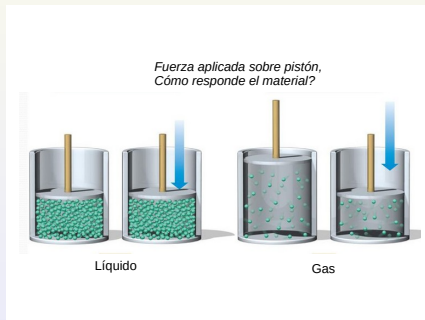


Definición

- Cambio en volumen (o deformación) causado por cambio en esfuerzo

Fuente: <http://images.slideplayer.com/10/2770826/>

Compresibilidad

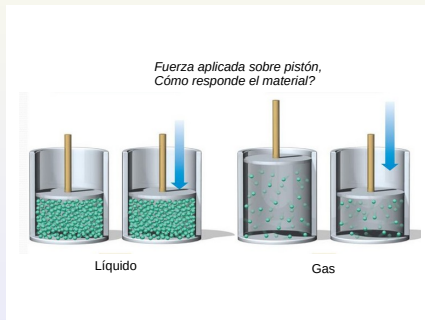


Definición

- Cambio en volumen (o deformación) causado por cambio en esfuerzo
- **Mecánica de Sólidos:**
Módulo de Elasticidad
 $E = d\sigma/d\epsilon$

Fuente: <http://images.slideplayer.com/10/2770826/>

Compresibilidad



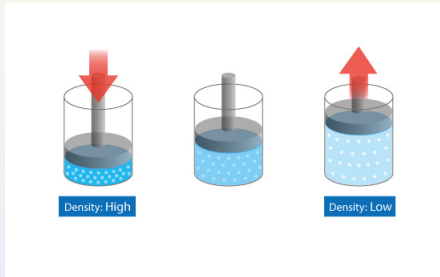
Fuente: <http://images.slideplayer.com/10/2770826/>

Definición

- Cambio en volumen (o deformación) causado por cambio en esfuerzo
- **Mecánica de Sólidos:**
Módulo de Elasticidad
 $E = d\sigma/d\epsilon$
- Compresibilidad

$$C_r = \frac{1}{E} = \frac{d\epsilon}{d\sigma} \quad (20)$$

Compresibilidad

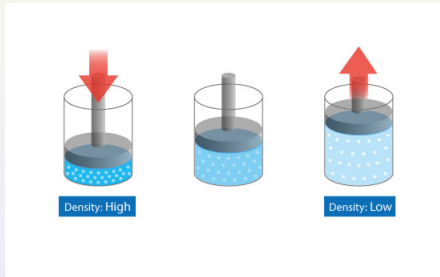


Fuente: <http://www.cradle-cfd.com>

Compresibilidad del H_2O

- Esfuerzo se transmite en un fluido mediante presión

Compresibilidad

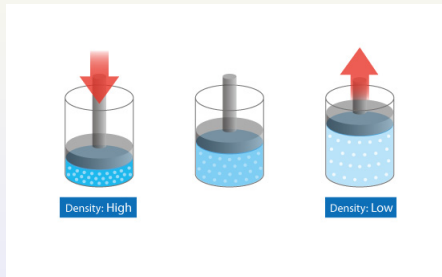


Fuente: <http://www.cradle-cfd.com>

Compresibilidad del H_2O

- ▶ Esfuerzo se transmite en un fluido mediante presión
- ▶ Incremento Δp causa Disminución ΔV

Compresibilidad



Fuente: <http://www.cradle-cfd.com>

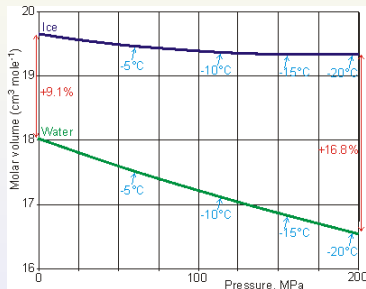
Compresibilidad del H₂O

- ▶ Esfuerzo se transmite en un fluido mediante presión
- ▶ Incremento Δp causa Disminución ΔV
- ▶ Compresibilidad del agua:

$$\beta = -\frac{dV_{H_2O}/V_{H_2O}}{dp} \quad (21)$$

(— requerido para $\beta > 0$)

Compresibilidad

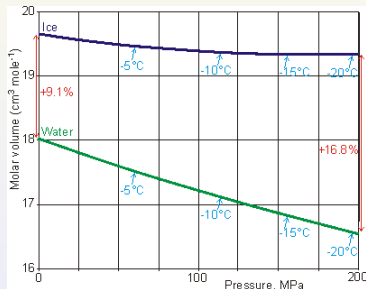


Compresibilidad del Agua

- Relación lineal entre $dV_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\text{H}_2\text{O}}$ y dp

Fuente: <http://www1.lsbu.ac.uk>

Compresibilidad

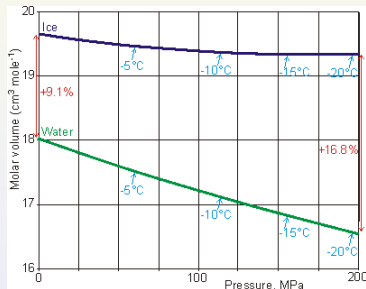


Compresibilidad del Agua

- Relación lineal entre $dV_{\text{H}_2\text{O}}/V_{\text{H}_2\text{O}}$ y dp
- β es pendiente

Fuente: <http://www1.lsbu.ac.uk>

Compresibilidad



Compresibilidad del Agua

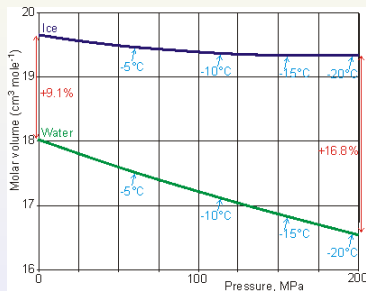
- Relación lineal entre dV_{H_2O}/V_{H_2O} y dp
- β es pendiente
- β es constante para rangos de presiones y Temperaturas en aguas subterráneas

Fuente: <http://www1.lsbu.ac.uk>

Compresibilidad

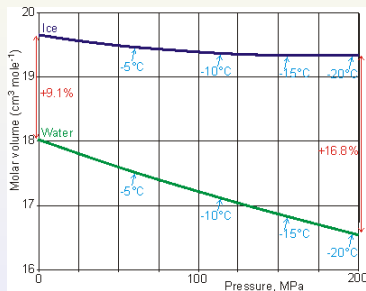
Compresibilidad de Agua

► $\beta_{H_2O} = 4,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$



Fuente: <http://www1.lsbu.ac.uk>

Compresibilidad



Fuente: <http://www1.lsbu.ac.uk>

Compresibilidad de Agua

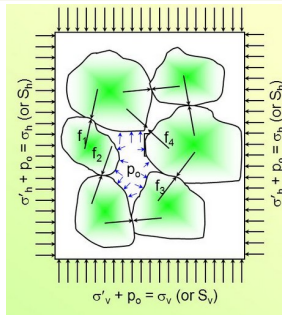
- ▶ $\beta_{H_2O} = 4,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$
- ▶ Dependencia con presión:

$$\beta = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (22)$$

- ▶ Integración ecuación anterior:

$$\rho = \rho_0 \exp [\beta(p - p_0)]$$

Compresibilidad



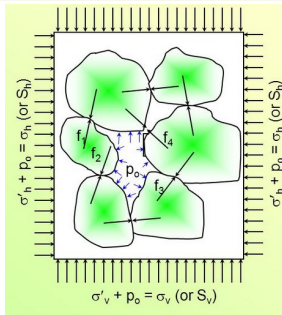
Esfuerzo Efectivo

- Definición: A partir del balance de fuerzas

$$\sigma_e = \sigma_T - p \quad (24)$$

Fuente: <http://images.slideplayer.com>

Compresibilidad



Fuente: <http://images.slideplayer.com>

Esfuerzo Efectivo

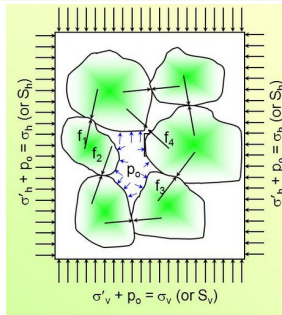
- Definición: A partir del balance de fuerzas

$$\sigma_e = \sigma_T - p \quad (24)$$

- O en términos de cambios:

$$d\sigma_e = d\sigma_T - dp \quad (25)$$

Compresibilidad

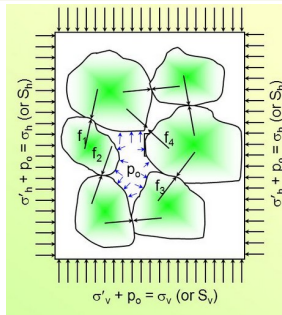


Esfuerzo Efectivo

- En muchos problemas $d\sigma_T \approx 0$

Fuente: <http://images.slideplayer.com>

Compresibilidad

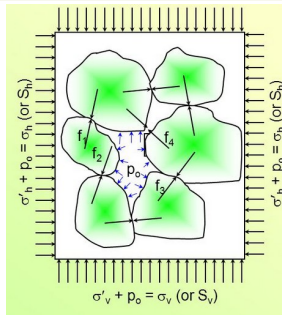


Fuente: <http://images.slideplayer.com>

Esfuerzo Efectivo

- ▶ En muchos problemas $d\sigma_T \approx 0$
- ▶ Esto implica: $d\sigma_e \approx -dp$

Compresibilidad



Esfuerzo Efectivo

- ▶ En muchos problemas $d\sigma_T \approx 0$
- ▶ Esto implica: $d\sigma_e \approx -dp$
- ▶ Presión $p = \rho gh$ y por ende:

$$dp = \rho g dh = -d\sigma_e \quad (26)$$

Fuente: <http://images.slideplayer.com>

Compresibilidad

Medio Poroso

- ▶ Extendiendo la definición de compresibilidad al medio poroso:

$$\alpha = \frac{-dV_T/V_T}{d\sigma_e} \quad (27)$$

donde V_T es el volumen total.

Compresibilidad

Medio Poroso

- ▶ Extendiendo la definición de compresibilidad al medio poroso:

$$\alpha = \frac{-dV_T/V_T}{d\sigma_e} \quad (27)$$

donde V_T es el volumen total.

- ▶ El volumen total está definido como $V_T = V_S + V_v$

Compresibilidad

Medio Poroso

- ▶ Extendiendo la definición de compresibilidad al medio poroso:

$$\alpha = \frac{-dV_T/V_T}{d\sigma_e} \quad (27)$$

donde V_T es el volumen total.

- ▶ El volumen total está definido como $V_T = V_S + V_v$
- ▶ donde V_v volumen de vacíos

Compresibilidad

Medio Poroso

- Los cambios de volumen se pueden expresar como:

$$dV_T = dV_S + dV_v \quad (28)$$

Compresibilidad

Medio Poroso

- ▶ Los cambios de volumen se pueden expresar como:

$$dV_T = dV_S + dV_v \quad (28)$$

- ▶ $dV_S \approx 0$

Compresibilidad

Medio Poroso

- ▶ Los cambios de volumen se pueden expresar como:

$$dV_T = dV_S + dV_v \quad (28)$$

- ▶ $dV_S \approx 0$ El cambio del volumen de los minerales es pequeño durante extracción

Compresibilidad

Medio Poroso

- ▶ Los cambios de volumen se pueden expresar como:

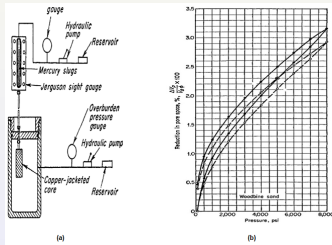
$$dV_T = dV_S + dV_v \quad (28)$$

- ▶ $dV_S \approx 0$ El cambio del volumen de los minerales es pequeño durante extracción
- ▶ Y por lo tanto $dV_T \approx dV_v$

Compresibilidad

Medio Poroso

► Compresibilidad del Suelo

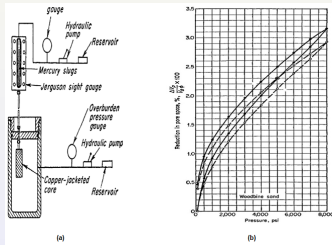


Compresibilidad

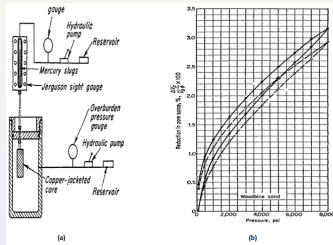
Medio Poroso

- Compresibilidad del Suelo
- Ecuación:

$$\alpha = -\frac{db/b}{d\sigma_e} = -\frac{de/(1 + e_0)}{d\sigma_e} \quad (29)$$



Compresibilidad



Medio Poroso

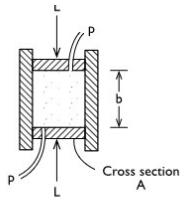
- Compresibilidad del Suelo

- Ecuación:

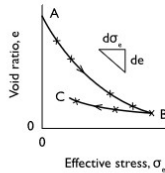
$$\alpha = -\frac{db/b}{d\sigma_e} = -\frac{de/(1 + e_0)}{d\sigma_e} \quad (29)$$

- **Int. Geom.** Pendiente gráfica deformación ϵ vs esfuerzo σ_e

Compresibilidad



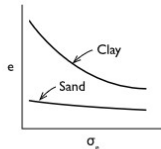
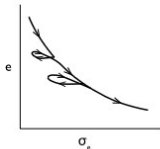
(a)



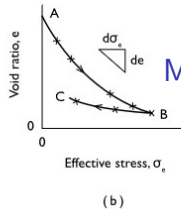
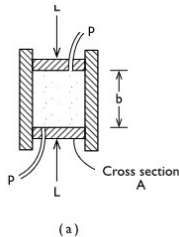
(b)

Medio Poroso

► Pendiente depende ciclo (carga vs descarga)

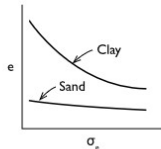
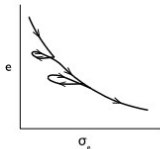


Compresibilidad

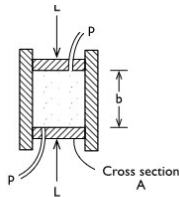


Medio Poroso

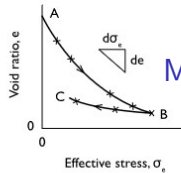
- Pendiente depende ciclo (carga vs descarga)
- Relación $\sigma_e - \epsilon$ es no-lineal



Compresibilidad



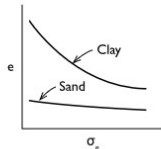
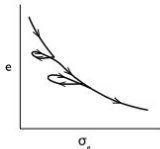
(a)



(b)

Medio Poroso

- Pendiente depende ciclo (carga vs descarga)
- Relación $\sigma_e - \epsilon$ es no-lineal
- Relación $\sigma_e - \epsilon$ no es función (histéresis)



Compresibilidad

Medio Poroso

- **Hidrogeología**: variaciones temporales de σ_e son pequeñas

Compresibilidad

Medio Poroso

- ▶ **Hidrogeología**: variaciones temporales de σ_e son pequeñas
- ▶ α se puede considerar constante

Compresibilidad

Medio Poroso

- ▶ **Hidrogeología**: variaciones temporales de σ_e son pequeñas
- ▶ α se puede considerar constante
- ▶ Valores típicos para arenas/arcillas (Tabla)

Compresibilidad

Acuífero

- Compresibilidad del suelo: concepto 1D

Compresibilidad

Acuífero

- ▶ Compresibilidad del suelo: concepto 1D
- ▶ **Suposición:** σ_e actúa verticalmente

Compresibilidad

Acuífero

- ▶ Compresibilidad del suelo: concepto 1D
- ▶ **Suposición:** σ_e actúa verticalmente
- ▶ **Pregunta:** Es cierto?

Compresibilidad

Acuífero

- ▶ Compresibilidad del suelo: concepto 1D
- ▶ **Suposición:** σ_e actúa verticalmente
- ▶ **Pregunta:** Es cierto?
- ▶ σ_T : producido por peso roca + H_2O suprayacentes

Compresibilidad

Acuífero

- ▶ $h \downarrow$: Durante extracción de agua cerca del Pozo

Compresibilidad

Acuífero

- ▶ $h \downarrow$: Durante extracción de agua cerca del Pozo
- ▶ $p \downarrow \rightarrow \sigma_e \uparrow$

Compresibilidad

Acuífero

- ▶ $h \downarrow$: Durante extracción de agua cerca del Pozo
- ▶ $p \downarrow \rightarrow \sigma_e \uparrow$
- ▶ $b \downarrow \rightarrow$ Espesor de la capa disminuye en zona de influencia de bombeo.

Almacenamiento Específico

Definición

- El **coeficiente de almacenamiento** S es el volumen de agua que un volumen unitario de acuífero libera del almacenamiento por unidad de descenso del nivel piezométrico:

$$S_s = \frac{V_{H_2O}}{V_{Ac} \times \Delta h} \quad (30)$$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- Compactación del acuífero: vol. H_2O expulsada = reducción vol. acuífero

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Compactación del acuífero: vol. H_2O expulsada = reducción vol. acuífero
- ▶ $dV_{H_2O,V} = -dV_T = \alpha V_T d\sigma_e$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Compactación del acuífero: vol. H_2O expulsada = reducción vol. acuífero
- ▶ $dV_{H_2O,V} = -dV_T = \alpha V_T d\sigma_e$
- ▶ $dV_{H_2O,V} = \alpha V_T \rho g dh$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Compactación del acuífero: vol. H_2O expulsada = reducción vol. acuífero
- ▶ $dV_{H_2O,V} = -dV_T = \alpha V_T d\sigma_e$
- ▶ $dV_{H_2O,V} = \alpha V_T \rho g dh$
- ▶ De la definición $dh = -1$, $dV_{H_2O,V} = \alpha V_T$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- Compresibilidad de agua: vol. H_2O expulsada por incremento en vol. H_2O

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Compresibilidad de agua: vol. H_2O expulsada por incremento en vol. H_2O
- ▶ $dV_{H_2O,C} = -\beta V_{H_2O} dp$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Compresibilidad de agua: vol. H_2O expulsada por incremento en vol. H_2O
- ▶ $dV_{H_2O,C} = -\beta V_{H_2O} dp$
- ▶ $V_{H_2O,C} = \phi V_T$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Compresibilidad de agua: vol. H_2O expulsada por incremento en vol. H_2O
- ▶ $dV_{H_2O,C} = -\beta V_{H_2O} dp$
- ▶ $V_{H_2O,C} = \phi V_T$
- ▶ $dp = \rho g dh$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Compresibilidad de agua: vol. H_2O expulsada por incremento en vol. H_2O
- ▶ $dV_{H_2O,C} = -\beta V_{H_2O} dp$
- ▶ $V_{H_2O,C} = \phi V_T$
- ▶ $dp = \rho g dh$
- ▶ $dV_{H_2O,C} = -\beta \phi V_T \rho g dh$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Por definición $dh = -1$ y $V_T = 1$ entonces $dV_{H_2O,C} = \beta \phi \rho g$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- ▶ Por definición $dh = -1$ y $V_T = 1$ entonces $dV_{H_2O,C} = \beta \phi \rho g$
- ▶ Volumen total de agua liberado del almacenamiento

$$dV_{H_2O} = dV_{H_2O,V} + dV_{H_2O,C} \quad (31)$$

Almacenamiento Específico

Desarrollo

- y reemplazando la definición de cada uno de estos volúmenes:

$$S_s = \rho g(\alpha + \phi\beta) \quad (32)$$

Coeficiente de Almacenamiento

Coeficiente de Almacenamiento

- El **Coeficiente de Almacenamiento** se define como:

$$S = S_s \times b \quad (33)$$

donde b es el espesor del acuífero.

Coeficiente de Almacenamiento

Coeficiente de Almacenamiento

- ▶ El **Coeficiente de Almacenamiento** se define como:

$$S = S_s \times b \quad (33)$$

donde b es el espesor del acuífero.

- ▶ Por qué definimos S ?

Coeficiente de Almacenamiento

Coeficiente de Almacenamiento

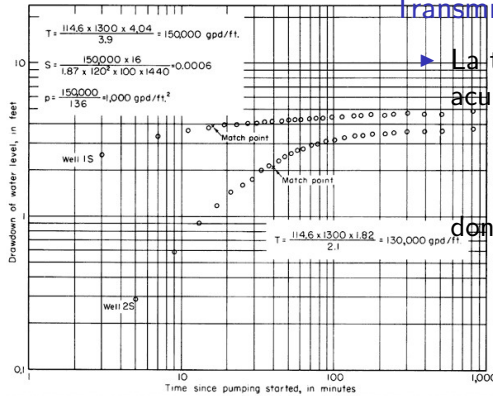
- ▶ El **Coeficiente de Almacenamiento** se define como:

$$S = S_s \times b \quad (33)$$

donde b es el espesor del acuífero.

- ▶ Por qué definimos S ?
- ▶ Esto es lo que estimamos con las **pruebas de bombeo**

Transmisividad



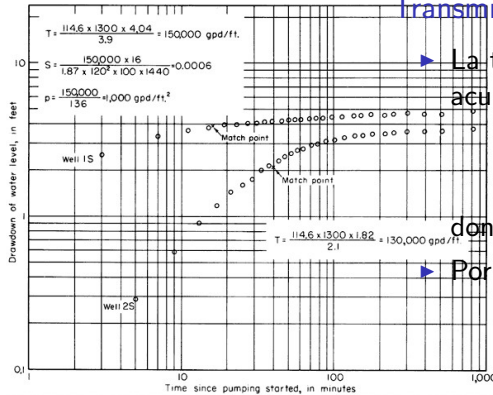
Transmisividad

► La transmisividad de un acuífero se define como:

$$T = Kb \quad (34)$$

donde ya saben que es b .

Transmisividad



Transmisividad

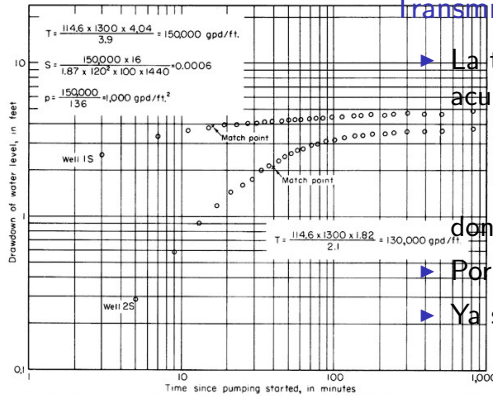
► La transmisividad de un acuífero se define como:

$$T = Kb \quad (34)$$

donde ya saben que es b .

► Por qué se define T ?

Transmisividad



Transmisividad

- ▶ La transmisividad de un acuífero se define como:

$$T = Kb \quad (34)$$

donde ya saben que es b .

- ▶ Por qué se define T ?
- ▶ Ya saben la razón.