

DIPLOMADO INTERNACIONAL



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

En **Caracterización y
Remediación de Suelos
y Acuíferos
Contaminados por**

Hidrocarburos



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM



TEMARIO GENERAL

MÓDULO 1.- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA (25 horas)

MÓDULO 2.- CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS CONTAMINADOS (31 horas)

MÓDULO 3.- TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS (32 horas)

MÓDULO 4.- MODELACIÓN NUMÉRICA DE ACUÍFEROS (12 horas)

MÓDULO 5.- EXPOSICIÓN DE CASOS-ESTUDIO (10 horas)

DURACIÓN TOTAL: 110 HORAS

MÓDULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA (25 h).

Tema	Institución	Expositor	Fecha	Horario	Sede
1. Definiciones de medio poroso, "suelo" y procesos geológicos que dan lugar a los suelos	UPC	Luis Miguel Doménech	Jueves 2 Oct 2008	16:00 a 21:00 h	Palacio de Minería
2. Propiedades físicas de los medios porosos:					
▪ Granulometría					
▪ Capacidad de campo y contenido volumétrico de agua					
▪ Densidad aparente y real					
▪ Porosidad total y eficaz					
▪ Permeabilidad intrínseca y conductividad hidráulica					
▪ Saturación					
3. Propiedades químicas y biológicas de los suelos:	FI UNAM	Antonio Hernández Espriu	Viernes 3 Oct 2008	16:00 a 21:00 h	Palacio de Minería
▪ pH					
▪ Carbono orgánico total					
▪ Fósforo disponible					
▪ Nitrógeno total (kjheldal)					
▪ Población y actividad microbiana					
4. Conceptos hidrogeológicos	FI UNAM	Antonio Hernández Espriu	Sábado 4 Oct 2008	10:00 a 14:00 h	Palacio de Minería
▪ Generalidades					
▪ Parámetros hidrogeológicos: conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento específico, rendimiento específico					
▪ Ley de Darcy					
▪ Hidráulica de acuíferos y flujo de agua en medios porosos saturados					
▪ Hidráulica de pozos					
▪ Ecuación General de Flujo					
▪ Generalidades del flujo en medios no porosos (fracturados y kársticos)					
5. Transporte de contaminantes en medios porosos saturados:	FI UNAM	Noél Hernández Laloth	Jueves 9 Oct 2008	17:00 a 21:00 h	Instituto de Ing. Edif. 1
▪ Principios					
▪ Procesos de transporte					
▫ Advección					
▫ Difusión molecular					
▫ Dispersión hidrodinámica					
▫ Sorción					
▫ Otros procesos particulares					
▪ Ecuación General de Transporte (EAD)					
▪ Soluciones particulares de la EAD					
▫ Para flujo uni-dimensional					
▫ Para flujo bi-dimensional					
▫ Para transporte reactivo					
▫ Para medios heterogéneos					
6. Introducción al flujo no saturado (distribución de agua en el subsuelo), Transporte no saturado	CNA	Pedro Soto		18:10 a 21:00 h	
▪ Introducción al flujo multifase					
▪ Aplicaciones y ejemplos					



7	Marco general de la gestión de sitios contaminados	II UNAM	Jessica Lopez	Sábado 11 oct 2008	10:00 a 11:50 h	Instituto de Ing. Edif. 1
8.	Marco legal mexicano y guías ambientales internacionales (EPA, ASTM, etc.)					
9.	Manejo y disposición de residuos peligrosos					
MÓDULO 2. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS CONTAMINADOS (31 h)						
1.	Introducción y generalidades	II UNAM	Guillermina Pérez	Sábado 11 oct 2008	12:10 a 14:00	Instituto de Ing. Edif. 1
2	Caracterización de suelos contaminados					
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recopilación de información geográfica, geológica e hidrológica del sitio ▪ Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo ▪ Antecedentes del sitio contaminado 					
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identificación de fuentes contaminantes y tipos de contaminantes <ul style="list-style-type: none"> ▫ Generalidades de los contaminantes orgánicos ▪ Generación del modelo conceptual previo ▪ Muestreo de suelo <ul style="list-style-type: none"> ▫ Consideraciones generales del muestreo ▫ Tipo de perforaciones 	II UNAM	Adriana Ramírez	Jueves 16 oct 2008	17:00 a 18:50	Instituto de Ing. Edif. 1
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Configuración de mapas de isoconcentraciones ▪ Uso de programas especializados (SURFER) ▪ Estimación de la volumetría de suelo contaminado ▪ Establecer niveles de remediación ▪ Evaluación de las técnicas adecuadas para remediación ▪ Ejemplos de casos reales 					
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Configuración de mapas de isoconcentraciones ▪ Uso de programas especializados (SURFER) ▪ Estimación de la volumetría de suelo contaminado ▪ Establecer niveles de remediación ▪ Evaluación de las técnicas adecuadas para remediación ▪ Ejemplos de casos reales 	Geozima	Alberto Trejo García	Viernes 17 oct 2008	17:00 a 21:00	Palacio de Minería TALLER-PC
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Establecer niveles de remediación ▪ Evaluación de las técnicas adecuadas para remediación ▪ Ejemplos de casos reales 	II UNAM	Jessica López	Sábado 18 oct 2008	10:00 a 11:50	Instituto de Ing. Edif. 1
3.	Caracterización ambiental de agua subterránea	IGFUNAM	Claudia Arango		12:10 a 14:00	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Métodos indirectos de investigación (geofísica aplicada) ▪ Monitoreo de agua subterránea <ul style="list-style-type: none"> ▫ Bailer ▫ Bombeo ▫ A bajo caudal ▫ Métodos emergentes ▪ Diseño de pozos de monitoreo <ul style="list-style-type: none"> ▫ Pozos y piezómetros convencionales ▫ Multi-piezómetros o pozos multinivel ▪ Monitoreo automatizado e instrumentación de acuíferos ▪ Estimación de parámetros hidráulicos <ul style="list-style-type: none"> ▫ Diseño e interpretación de ensayos hidráulicos de bombeo y recuperación a caudal constante ▫ Diseño e interpretación de ensayos slug ▫ Trazadores ▫ Uso de software especializado (WHI AQUITEST) ▪ Caracterización de Lnapl's y Dnapl's 	GEOZIMA	Alberto Trejo	Jueves 23 oct 2008	17:00 a 18:50	Instituto de Ing. Edif. 1
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diseño de pozos de monitoreo <ul style="list-style-type: none"> ▫ Pozos y piezómetros convencionales ▫ Multi-piezómetros o pozos multinivel ▪ Monitoreo automatizado e instrumentación de acuíferos ▪ Estimación de parámetros hidráulicos <ul style="list-style-type: none"> ▫ Diseño e interpretación de ensayos hidráulicos de bombeo y recuperación a caudal constante ▫ Diseño e interpretación de ensayos slug ▫ Trazadores ▫ Uso de software especializado (WHI AQUITEST) ▪ Caracterización de Lnapl's y Dnapl's 	FI UNAM	Antonio Hernández Espriu		19:10 a 21:00	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estimación de parámetros hidráulicos <ul style="list-style-type: none"> ▫ Diseño e interpretación de ensayos hidráulicos de bombeo y recuperación a caudal constante ▫ Diseño e interpretación de ensayos slug ▫ Trazadores ▫ Uso de software especializado (WHI AQUITEST) ▪ Caracterización de Lnapl's y Dnapl's 	FI UNAM	Noél Hernández Laloth	Viernes 24 oct 2008	17:00 a 21:00	Palacio de Minería TALLER-PC



<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vulnerabilidad de acuíferos y perímetros de protección de pozos ▪ Ejemplo de casos reales 		Castro	25 oct 2008		Edif. 1
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ejemplo de casos reales 		Por confirmar		12:10 a 14:00	
4. Evaluación de riesgo	II UNAM	Rosa María Flores	Jueves 30 oct 2008	16:00 a 21:00	Palacio de Minería
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Introducción al análisis de riesgo <ul style="list-style-type: none"> ▫ Identificación del peligro ▫ Evaluación de la exposición ▫ Evaluación de la toxicidad (dosis-respuesta) ▫ Caracterización integral de riesgo ▫ Integración de ARSH y caracterizaciones ambientales ▪ Concepto de las "decisiones basadas en riesgo" <ul style="list-style-type: none"> ▫ Metodología de la EPA y posteriores modificaciones ▫ Uso de software especializado (RBCA y/o RISC) ▪ Ejemplos de casos reales 					TALLER-PC



MÓDULO 3. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS (32 h)											
Tema	Institución	Expositor	Fecha	Horario	No. Sesión						
1. Técnicas de remediación biológicas	II UNAM	Lilia Corona	Viernes 31 oct 2008	17:00 a 18.50	Instituto de Ing. Edif. 1						
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bioestimulación ▪ Bioaumentación ▪ Bioventeo ▪ Atenuación natural ▪ Biopilas ▪ Biolabranza ▪ Fitorremediación 						Jessica López	19:10 a 21:00				
2. Técnicas de remediación térmicas		UPC	Andrés Navarro	Jueves 6 nov 2008				16:00 a 21:00 h	Palacio de Minería		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desorción térmica ▪ Incineración ▪ Pirolisis 										Viernes 7 nov 2008	16:00 a 21:00 h
3. Técnicas de contención				UPIBI IPN				Luis Torres	Jueves 13 nov 2008		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Paredes de cemento ▪ Paredes de paneles ▪ Geomembranas 										Sábado 8 nov 2008	9:00 a 14:00 h
4. Técnicas de remediación fisicoquímicas				II UNAM		Rosario Iturbe					
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deshalogenación química ▪ Extracción de vapores ▪ Bombeo y tratamiento ▪ Electrocínética ▪ Solidificación/Estabilización ▪ Pantallas reactivas permeables ▪ Modelos ▪ Lavado de suelo <ul style="list-style-type: none"> ▫ <i>In situ</i> ▫ Fuera del sitio 	18.40 a 21:00										
5. Aspectos técnico-económicos de los sistemas de remediación				Sábado 15 nov 2008	8:00 a 16:00	Externa					
6. Ejemplos de casos reales											
Visita de campo a sitio en proceso de remediación											




MÓDULO 4. MODELACIÓN NUMÉRICA DE ACUÍFEROS (12 h)

Tema	Institución	Expositor	Fecha	Horario	No. Sesión
1. Principios básicos de la modelación de aguas subterráneas	IG UNAM	Oscar Escolero	20 nov 2008	16:00 a 21:00 h	Palacio de Minería
▪ Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico					
▪ Discretización espacial					
▪ Discretización temporal					
▪ Condiciones de frontera					
▪ Condiciones iniciales					
▪ Calibración y análisis de sensibilidad					
▪ Presentación de resultados					
2. Simulación hidrodinámica	IG UNAM	Oscar Escolero	21 nov 2008	16:00 a 21:00 h	Palacio de Minería TALLER-PC
▪ Ecuación General de Flujo					
▪ Régimen en Estado Estacionario					
▪ Régimen en Estado Transitorio					
▪ Ejemplos de aplicación					
▪ Planteamiento de escenarios					
▪ Procesamiento de datos					
3. Simulación de transporte de contaminantes	IG UNAM	Oscar Escolero	22 nov 2008	10:00 a 14:00 h	Palacio de Minería TALLER-PC
▪ Ecuación General de Transporte					
▪ Transporte por Advección					
▪ Transporte por Difusión					
▪ Fuentes puntuales					
▪ Fuentes difusas					
▪ Ejemplos de aplicación					
▪ Procesamiento de datos					



MÓDULO 5: EXPOSICIÓN DE CASOS-ESTUDIO (10 h)					
Tema	Institución	Expositor	Fecha	Horario	No. Sesión
Exposición de casos-estudio por parte de los participantes	No Aplica	Participantes	27 nov 2008	16:00 a 21:00 h	Instituto de Ing. Edif. 1
	No Aplica	Participantes	28 nov 2008	16:00 a 21:00 h	Instituto de Ing. Edif. 1
Clausura y entrega de Diplomas			29 nov 2008	10:00 a 12:00 h	Palacio de Minería

UPC: Universidad Politécnica de Cataluña, España; FI UNAM: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México; CNA: Comisión Nacional del Agua; II UNAM: Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México; IPN: Instituto Politécnico Nacional, IGF: Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México; IGUNAM: instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México; Consorcio GEOZIMA: Consultoría de Servicios Ambientales

	Diplomado: En Caracterización y remediación de suelos y acuíferos contaminados por hidrocarburos
<p>DIPLOMADO EN: “CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS”</p> <p>Módulo I: Fundamentación teórica Tema 4: Conceptos hidrogeológicos</p> <p>ING. GEÓLOGO ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU PROFESOR DE TIEMPO COMPLETO DEL ÁREA DE HIDROGEOLOGÍA Y GEOLOGÍA AMBIENTAL.</p> <p>Departamento de Geología División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Facultad de Ingeniería; UNAM.</p> <p>ahespriu@dictf.unam.mx www.dict.unam.mx</p>	

CONTENIDO
<ul style="list-style-type: none"> • Generalidades • Situación general del agua subterránea en México • Conceptos fundamentales • Distribución del agua en el subsuelo • Unidades hidrogeológicas e Hidroestratigrafía • Tipos de acuíferos • Propiedades de los sistemas hidrogeológicos • Experimento y Ley de Darcy • Ecuación General de Flujo • Hidráulica de acuíferos y flujo en medios porosos • Hidráulica de pozos
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MODULO I: TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLOGICOS

OBJETIVO DEL TEMA 4
<ul style="list-style-type: none"> • Uniformizar el conocimiento en los participantes del diplomado, en relación con la Hidrogeología y aguas subterráneas. • Familiarizarse con los conceptos hidrogeológicos y la metodología de estudio, como una base teórica para la aplicación de los mismos en proyectos de caracterización y remediación de acuíferos contaminados por hidrocarburos.
<p>ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS</p>

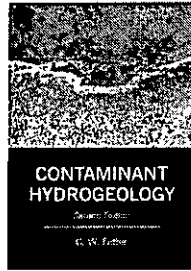
BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA
<p style="text-align: center;">BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA</p>
<p>ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS</p>

HIDROGEOLOGIA Y AGUAS SUBTERRANEAS

Applied
Hydrogeology

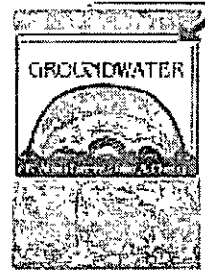


C. W. Fetter

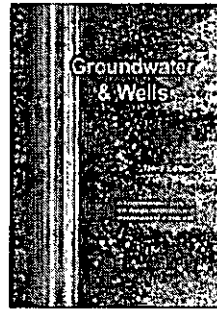


CONTAMINANT
HYDROGEOLOGY

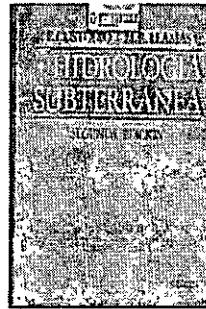
C. W. Fetter



GROUNDWATER



Groundwater
& Wells

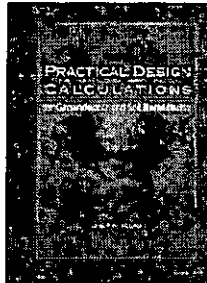


HIDROLOGIA
SUBTERRANEA

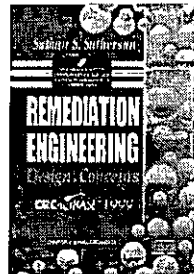
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I, TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLOGICOS

CARACTERIZACIÓN Y REMEDIACIÓN



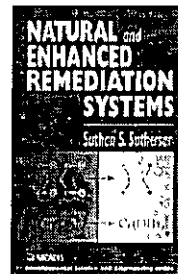
PRACTICAL DESIGN
CALCULATIONS



REMEDIA-
TION
ENGINEERING

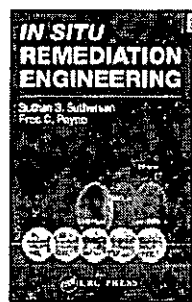
Design Concepts

CRC/TAJ/1000



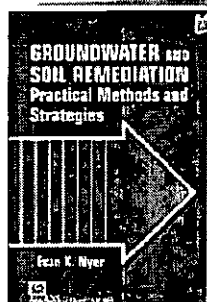
NATURAL
and
ENHANCED
REMEDIA-
TION
SYSTEMS

Suzhen S. Suthersan



IN SITU
REMEDIA-
TION
ENGINEERING

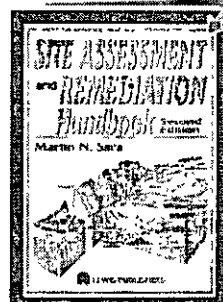
Suzhen S. Suthersan
Fred C. Payne



GROUNDWATER
AND
SOIL
REMEDIA-
TION

Practical Methods and
Strategies

Fein K. Neyer



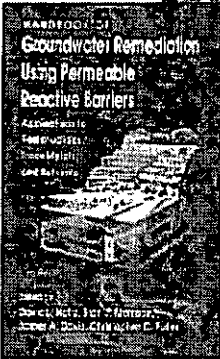
SITE ASSESSMENT
and
REMEDIA-
TION
Handbook

Martin N. Suter


ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I, TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLOGICOS

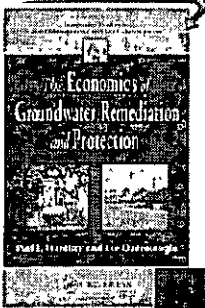
TEMAS ESPECÍFICOS



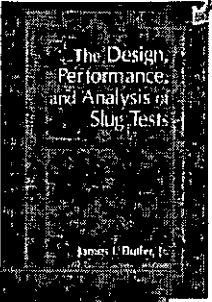
Groundwater Remediation
Using Permeable
Reactive Barriers



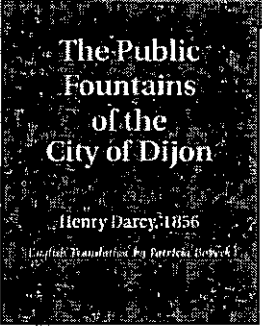
MTBE
Remediation
Handbook



The Economics of
Groundwater Remediation
and Protection



The Design,
Performance,
and Analysis of
Slug Tests



The Public
Fountains
of the
City of Dijon

Henry Darcy, 1856
English Translation by Petrarcha Borek

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ÉSPRIU. MÓDULO I TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

REVISTAS CIENTÍFICAS

Hydrological
Journal

ground
water

Groundwater Remediation

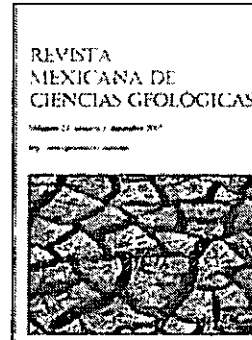
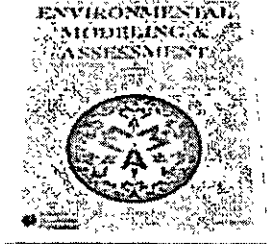
Contaminant Hydrology

Hydrology and
Earth System
Sciences

Environmental
Geology

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ÉSPRIU. MÓDULO I TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

REVISTAS CIENTÍFICAS



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

1. GENERALIDADES

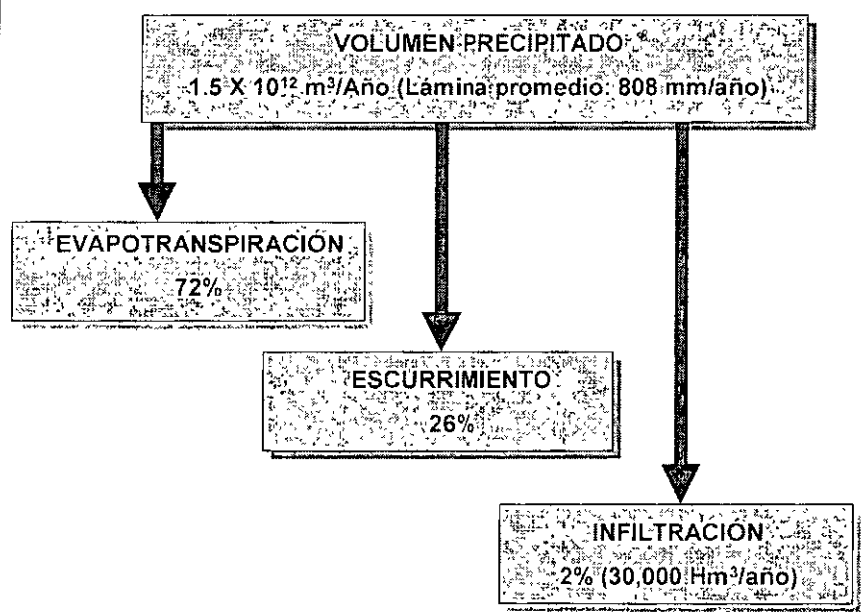
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I. TEMA 4. CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

1. GENERALIDADES: SITUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN MÉXICO

- Las **aguas subterráneas** representan una parte fundamental del ciclo hidrológico, cuyo aprovechamiento, gestión y buen entendimiento representan una fuente confiable y económica del recurso hídrico.
- Deficientes prácticas industriales, agrícolas e industriales han ocasionado el impacto de unidades hidrogeológicas por compuestos orgánicos e inorgánicos, generando una **progresiva degradación del agua subterránea y del entorno medioambiental**.
- México, al ser un país árido y semiárido, es un importantísimo usuario del agua subterránea. Cerca del **50% del agua para consumo humano proviene del subsuelo**, de un total de **653 acuíferos** delimitados por la Comisión Nacional del Agua, con base a criterios técnico-administrativos (CONAGUA, 2007).

1. GENERALIDADES: BALANCE HIDROMETEOROLÓGICO NACIONAL



1. GENERALIDADES: SITUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN MÉXICO

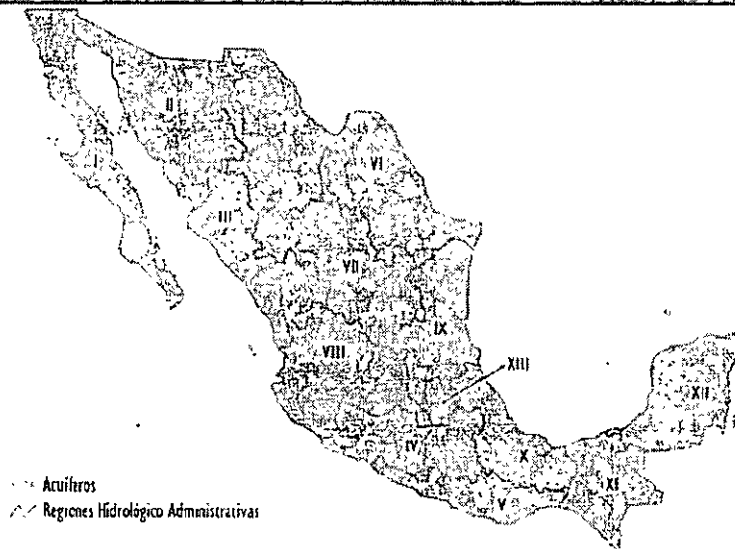
- A partir de 1960, el uso del agua subterránea ha venido en creciente aumento, por lo que el número de acuíferos sobreexplotados (*) ha crecido notablemente
- La explotación intensiva, genera una disminución en las reservas de aproximadamente 8 km³/Año, del orden del 26% de la recarga media anual (CONAGUA, 2007).

AÑO	Acuíferos sobreexplotados
1975	32
1981	36
1985	80
2001	97
2003	102
2006	105

(*) El término "sobreexplotación" está en desuso en la literatura especializada, y se ha sustituido por "explotación intensiva" o "uso intensivo de aguas subterráneas" (Llamas, 2002; Custodio-Llamas, 2003)

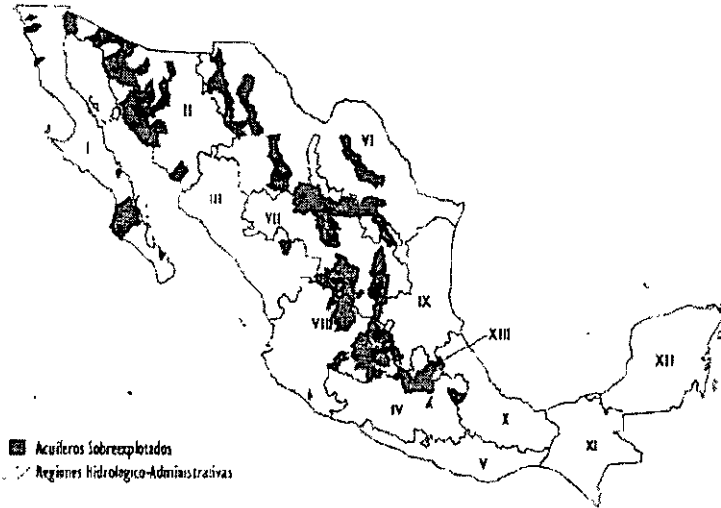
1. GENERALIDADES: ACUÍFEROS EN MÉXICO (653)

DELIMITACIÓN DE ACUÍFEROS POR REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA



1. GENERALIDADES: ACUÍFEROS EN MÉXICO. (105)

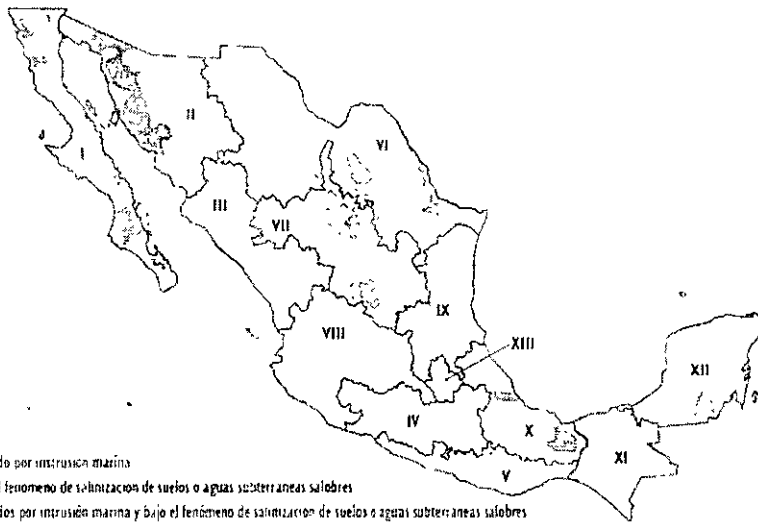
ACUÍFEROS CON SOBREPLOTADOS, POR REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA (2007)



■ Acuíferos sobreexplotados
 - - - Regiones Hidrológico-Administrativas

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU. FUENTE: (CONAGUA, SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA, 2007).

GENERALIDADES: ACUÍFEROS CON INTRUSIÓN MARINA (16)



▨ Afectado por intrusión marina
 Bajo el fenómeno de salinización de suelos o aguas subterráneas salobres
 ▨ Afectados por intrusión marina y bajo el fenómeno de salinización de suelos o aguas subterráneas salobres
 - - - Regiones Hidrológico Administrativas

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU. FUENTE: (CONAGUA, SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA, 2007).

1. GENERALIDADES: ZONAS DE VEDA (145)



La Ley de Aguas Nacionales (LAN) establece que:

Se restringen o prohíben extracciones de agua subterránea.

Títulos de concesión registrados en el REDPA.

La CONAGUA tiene la obligación de publicar la disponibilidad media de aguas nacionales.

La metodología se establece en la NOM - 011 - CNA - 2000.

Al 31/dic/06, se había publicado la disponibilidad de 202 acuíferos, de los que se extrae el 70% del agua subterránea del país.

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | FUENTE: (CONAGUA, SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA, 2007)

2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I: TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

• **Hidrogeología:** Rama de la Hidrología o Geología que estudia la ocurrencia, distribución y movimiento del agua subterránea. Aunque la **Hidrogeología** y la **Geohidrología** se utilizan como sinónimos, la literatura especializada, establece que la primera es cuantitativa y la segunda es cualitativa.

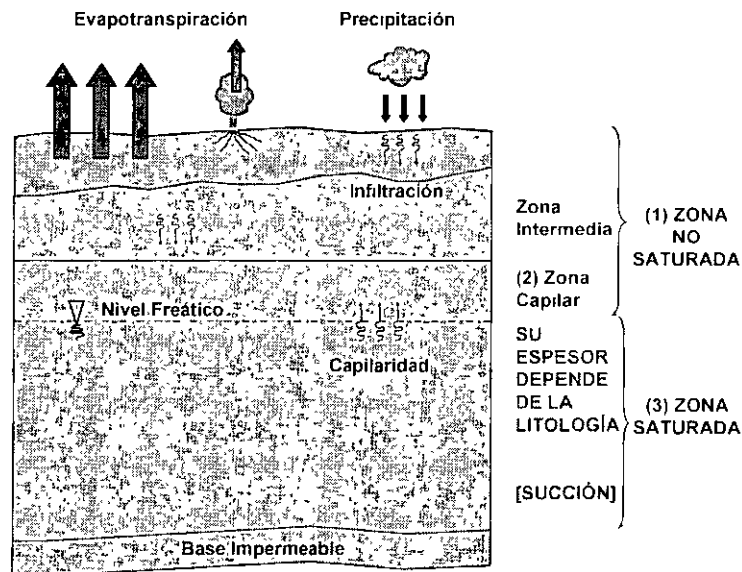
• **Ramas fundamentales:**

- **Mecánica de acuíferos** (Mecánica de fluidos en medios porosos)
- **Hidráulica de pozos** (Perturbación del flujo debido a bombeos)
- **Hidrogeoquímica** (Interacción geoquímica agua-roca)
- **Hidrogeofísica** (Métodos indirectos para la caracterización de acuíferos)
- **Hidrogeología de Contaminantes** (Transporte de solutos)
- **Hidrogeología Estocástica** (enfoque probabilístico y no determinístico)
- **Modelación** (Representación de un sistema por métodos numéricos)

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN EL SUBSUELO



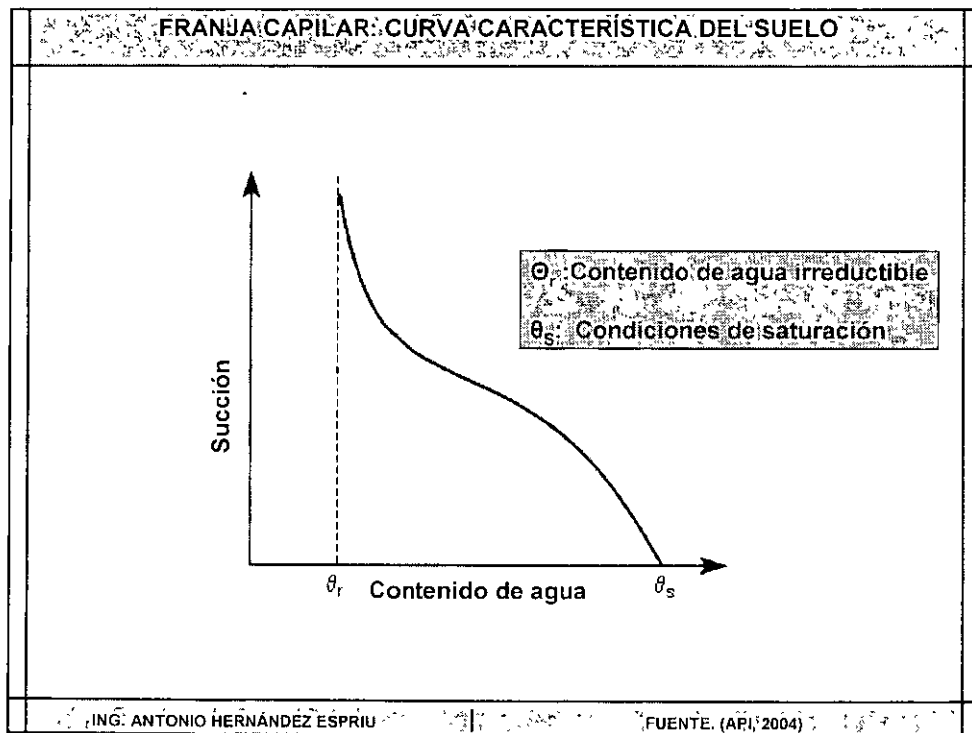
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (Martínez-Alfaro, et al., 2005)

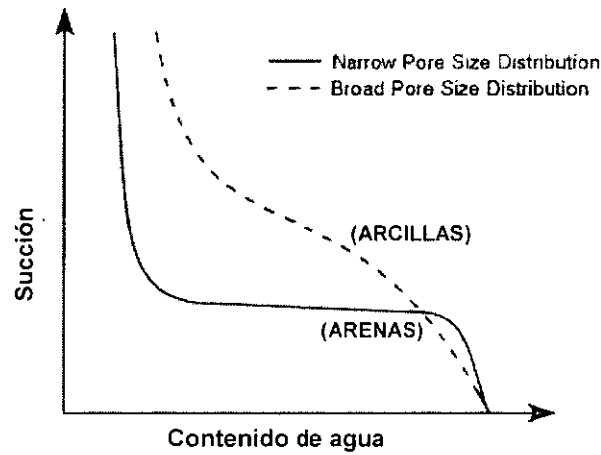
ESPESORES DE LA FRANJA CAPILAR			
Litología	Tamaño de grano (mm)	Radio del poro (cm)	Succión (cm) <i>Capillary rise</i>
Grava limpia	> 5	0.4	0.2 a 0.4
Arena gruesa	1 a 0.5	0.05	2 a 4
Arena fina	0.2 a 0.1	0.02	10 a 40
Limo	0.1 a 0.02	0.001	100 a 150
Arcilla	< 0.02 a 0.004	0.0005	> 300

$h_c = 0.15/r$ donde:
 h_c : Succión (cm)
 r : Radio del poro (cm)

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: (KOO, 1999)



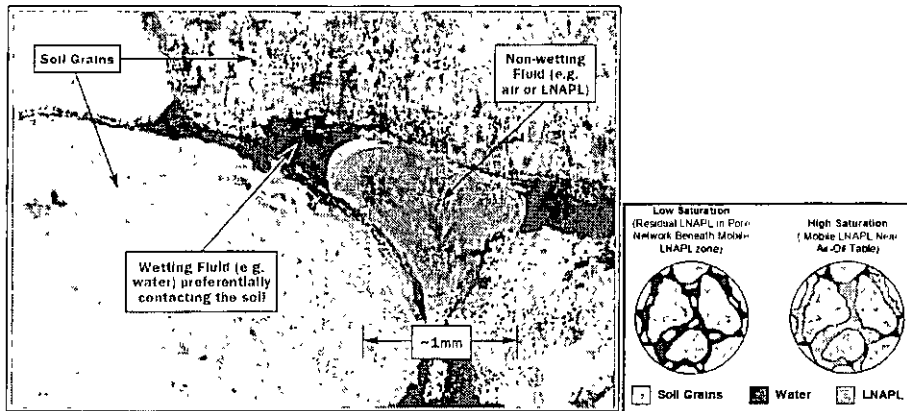
FRANJA CAPILAR: CURVA CARACTERÍSTICA DEL SUELO



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: (API, 2004)

APLICACIONES DE LA CURVA CARACTERÍSTICA

- Se aplica en la evaluación de flujos multifásicos en la zona no saturada (aire, agua e hidrocarburo en forma de contaminante).
- Existen modelos que utilizan parámetros que permiten describir el movimiento del agua en la zona no saturada y son críticos para evaluar el volumen, la movilidad y el movimiento de LNAPL's (Light Non-Aqueous Phase Liquids)



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: (API, 2004)

CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA

- La curva característica ha sido descrita matemáticamente por muchas ecuaciones empíricas, sin embargo las más utilizadas son:
 - **Brooks & Corey (BC)**
 - **van Genuchten (VG)**
- La ecuación de VG utiliza dos parámetros empíricos:
 - (1) α , que controla la forma de la curva y representa el tamaño y la conexión entre los poros. Valores altos de α , corresponden a pequeños espesores de la franja capilar
 - (2) n , que controla la distribución del tamaño de poro en el suelo. Valores altos de n , corresponden con distribuciones estrechas del tamaño de poro, típicas de suelos con granulometría gruesa.

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (API, 2004)

CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA

van Genuchten Properties

Soil Type	alpha (m ⁻¹)	n	Reference
Gravel	50.00	3.0	Huntley and Beckett, 2002
Coarse Sand	25.00	2.8	Huntley and Beckett, 2002
Sand	14.76	2.7	ES&T, 1996
Medium Sand	14.50	2.7	Huntley and Beckett, 2002
Loamy Sand	12.47	2.4	ES&T, 1996
Sandy Loam	7.55	2.0	ES&T, 1996
Fine Sand	7.50	1.9	Huntley and Beckett, 2002
Sandy Clay Loam	5.91	1.5	ES&T, 1996
Loam	3.61	1.7	ES&T, 1996
Silty Sand	3.60	1.6	Huntley and Beckett, 2002
Sandy Clay	3.18	1.8	ES&T, 1996
Clayey Sand	2.70	1.2	Huntley and Beckett, 2002
Silty Loam	2.20	1.7	ES&T, 1996
Clay Loam	2.10	1.7	ES&T, 1996
Silt	1.60	1.4	Huntley and Beckett, 2002
Silty Clay Loam	1.21	1.9	ES&T, 1996
Clayey Silt	1.00	1.2	Huntley and Beckett, 2002
Silty Clay	0.85	2.8	ES&T, 1996
Clay	0.20	1.1	Huntley and Beckett, 2002

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (API, 2004)

MODELO DE VG EN: www.api.org/lnapl (LNAPL INTERACTIVE GUIDE)

van Genuchten-Burdine Model of LNAPL Distribution and Relative Permeability

Enter Data in Yellow Region

Maximum Monitoring Well LNAPL Thickness [feet]	
$b_0 =$	3.000

Soil Characteristic	
$n =$	0.400 porosity
$N =$	4.000 van Genuchten "N"
$\alpha =$	2.000 van Genuchten ' α ' [ft ⁻¹]
$S_{wr} =$	0.150 irreducible water saturation
$S_{orn} =$	0.050 residual LNAPL saturation (nonse)
$S_{ors} =$	0.150 residual LNAPL saturation (saturated)

Fluid Characteristics:	
$\rho_o =$	0.750 LNAPL density [gm/cc]
$\sigma_{aw} =$	65.000 air/water surface tension [dyne/cm]
$\sigma_{ao} =$	25.000 air/LNAPL surface tension [dyne/cm]
$\sigma_{ow} =$	25.000 LNAPL/water surface tension [dyne/cm]

Calculated Parameters	
$M =$	0.750 van Genuchten "M"
$\alpha_{eo} =$	3.900 air/LNAPL ' α ' [ft ⁻¹]
$\alpha_{ow} =$	1.300 LNAPL/water ' α ' [ft ⁻¹]
$Z_{eo} =$	0.750 elevation of air-LNAPL interface [ft]
$Z_{ow} =$	-2.250 elevation of LNAPL-water interface [ft]
$Z_{max} =$	2.080 maximum free-product elevation [ft]
$\lambda =$	1.809 pore size distribution index
$\Psi_0 =$	0.359 [B/C] displacement pressure head [ft]

Set Tools > Option > Calculations tab to "Manual"
Press Ctrl+Shift+S to calculate sheet

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: (API, 2004)

MODELO DE VG EN: www.api.org/lnapl (LNAPL INTERACTIVE GUIDE)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O																																																																																																															
Monitoring Well LNAPL Thickness b_0 [ft] =					2.200																																																																																																																								
		D_e [ft] =	0.598	E_w =	0.368																																																																																																																								
Press Ctrl.Shift+S to calculate sheet																																																																																																																													
Enter b_0 value here to plot corresponding profiles																																																																																																																													
Saturation (red, blue)/Relative Permeability (black)																																																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Scale</th> <th>Elevation</th> <th>S_w</th> <th>S_o</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td></td><td>1.630</td><td>0.000</td><td></td></tr> <tr><td>0</td><td>1.630</td><td>0.052</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1.594</td><td>0.053</td><td>0</td></tr> <tr><td>2</td><td>1.559</td><td>0.053</td><td>0</td></tr> <tr><td>3</td><td>1.522</td><td>0.055</td><td>0</td></tr> <tr><td>4</td><td>1.485</td><td>0.056</td><td>0</td></tr> <tr><td>5</td><td>1.450</td><td>0.056</td><td>0</td></tr> <tr><td>6</td><td>1.414</td><td>0.060</td><td>0</td></tr> <tr><td>7</td><td>1.378</td><td>0.062</td><td>0</td></tr> <tr><td>8</td><td>1.342</td><td>0.065</td><td>0</td></tr> <tr><td>9</td><td>1.306</td><td>0.069</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>1.270</td><td>0.073</td><td>0</td></tr> <tr><td>11</td><td>1.234</td><td>0.078</td><td>0</td></tr> <tr><td>12</td><td>1.198</td><td>0.085</td><td>0</td></tr> <tr><td>13</td><td>1.162</td><td>0.093</td><td>0</td></tr> <tr><td>14</td><td>1.125</td><td>0.104</td><td>0</td></tr> <tr><td>15</td><td>1.090</td><td>0.117</td><td>0</td></tr> <tr><td>16</td><td>1.054</td><td>0.134</td><td>0</td></tr> <tr><td>17</td><td>1.018</td><td>0.157</td><td>0</td></tr> <tr><td>18</td><td>0.982</td><td>0.188</td><td>0</td></tr> <tr><td>19</td><td>0.946</td><td>0.224</td><td>0</td></tr> <tr><td>20</td><td>0.910</td><td>0.275</td><td>0</td></tr> <tr><td>21</td><td>0.874</td><td>0.340</td><td>0</td></tr> <tr><td>22</td><td>0.838</td><td>0.421</td><td>0</td></tr> <tr><td>23</td><td>0.802</td><td>0.517</td><td>0</td></tr> <tr><td>24</td><td>0.766</td><td>0.617</td><td>0</td></tr> <tr><td>25</td><td>0.730</td><td>0.730</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>														Scale	Elevation	S_w	S_o		1.630	0.000		0	1.630	0.052	0	1	1.594	0.053	0	2	1.559	0.053	0	3	1.522	0.055	0	4	1.485	0.056	0	5	1.450	0.056	0	6	1.414	0.060	0	7	1.378	0.062	0	8	1.342	0.065	0	9	1.306	0.069	0	10	1.270	0.073	0	11	1.234	0.078	0	12	1.198	0.085	0	13	1.162	0.093	0	14	1.125	0.104	0	15	1.090	0.117	0	16	1.054	0.134	0	17	1.018	0.157	0	18	0.982	0.188	0	19	0.946	0.224	0	20	0.910	0.275	0	21	0.874	0.340	0	22	0.838	0.421	0	23	0.802	0.517	0	24	0.766	0.617	0	25	0.730	0.730	0
Scale	Elevation	S_w	S_o																																																																																																																										
	1.630	0.000																																																																																																																											
0	1.630	0.052	0																																																																																																																										
1	1.594	0.053	0																																																																																																																										
2	1.559	0.053	0																																																																																																																										
3	1.522	0.055	0																																																																																																																										
4	1.485	0.056	0																																																																																																																										
5	1.450	0.056	0																																																																																																																										
6	1.414	0.060	0																																																																																																																										
7	1.378	0.062	0																																																																																																																										
8	1.342	0.065	0																																																																																																																										
9	1.306	0.069	0																																																																																																																										
10	1.270	0.073	0																																																																																																																										
11	1.234	0.078	0																																																																																																																										
12	1.198	0.085	0																																																																																																																										
13	1.162	0.093	0																																																																																																																										
14	1.125	0.104	0																																																																																																																										
15	1.090	0.117	0																																																																																																																										
16	1.054	0.134	0																																																																																																																										
17	1.018	0.157	0																																																																																																																										
18	0.982	0.188	0																																																																																																																										
19	0.946	0.224	0																																																																																																																										
20	0.910	0.275	0																																																																																																																										
21	0.874	0.340	0																																																																																																																										
22	0.838	0.421	0																																																																																																																										
23	0.802	0.517	0																																																																																																																										
24	0.766	0.617	0																																																																																																																										
25	0.730	0.730	0																																																																																																																										

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: (API, 2004)

MODELO DE VG:EN: www.api.org/lnapl (LNAPL INTERACTIVE GUIDE)

Free-Product Recovery System Analysis

$t_{recovery}$ [yr] =	30
R_0 [ft] =	20
μ_0 [cp] =	2
K_{av} [ft/d] =	5
ϵ_{soil} [ft] =	0.33

Water Enhanced	
Q_w [gpm] =	0
b_{well} [ft] =	15
$R_{recovery}$ [ft] =	206
ϵ_{well} [ft] =	0.08

Vacuum Enhanced	
$(-) p_w$ [atm] =	0
L_{well} [ft] =	10
k_{gr} =	0.9
Q_{av} [scfm] =	0.0
h_{well} [ft H ₂ O] =	0.0

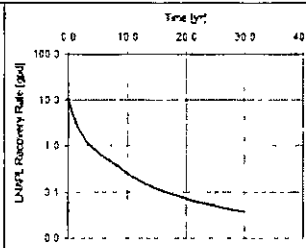
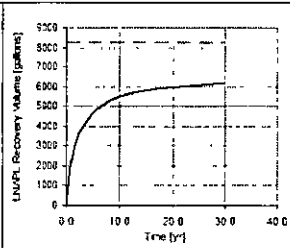
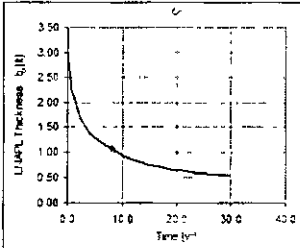
Skimmer Well

If $Q_w = 0$ and $p_w = 0$ then a skimmer well is assumed.

Average drawdown (buildup) within radius of capture

$h_{draw} [ft] = 15.7, h_{bu} = 0.00$ [ft]

Press Ctrl-Shift+S to calculate sheet



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

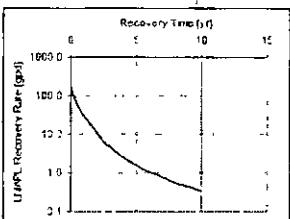
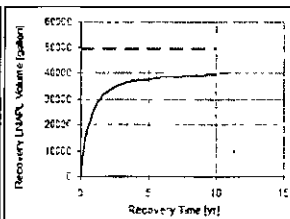
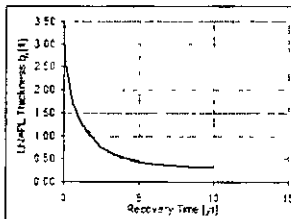
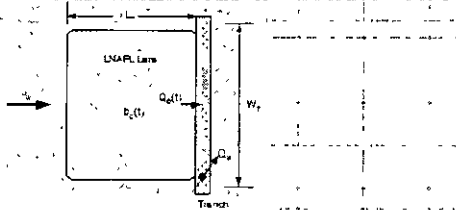
FUENTE: (API, 2004)

MODELO DE VG:EN: www.api.org/lnapl (LNAPL INTERACTIVE GUIDE)

Trench Recovery System

Press Ctrl-Shift+S to calculate sheet

$t_{recovery}$ [yr] =	10
μ_0 [cp] =	2
Q_w [gpm] =	2
J_w =	0.005
K_{av} [ft/d] =	15
W_T [ft] =	75
L_T [ft] =	100
b_T [ft] =	5



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

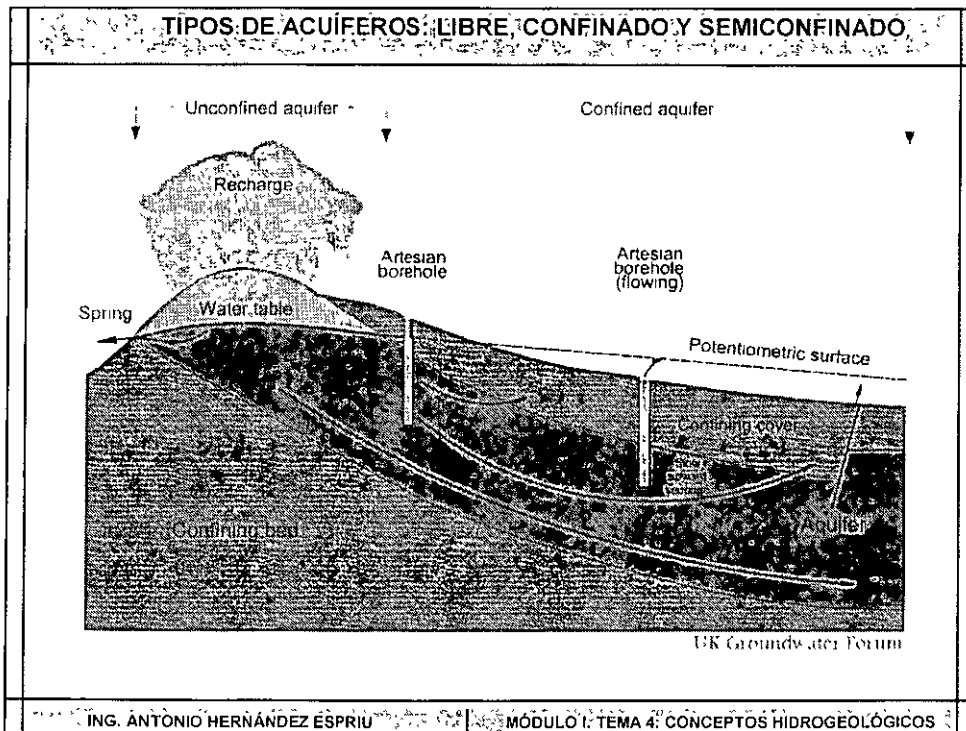
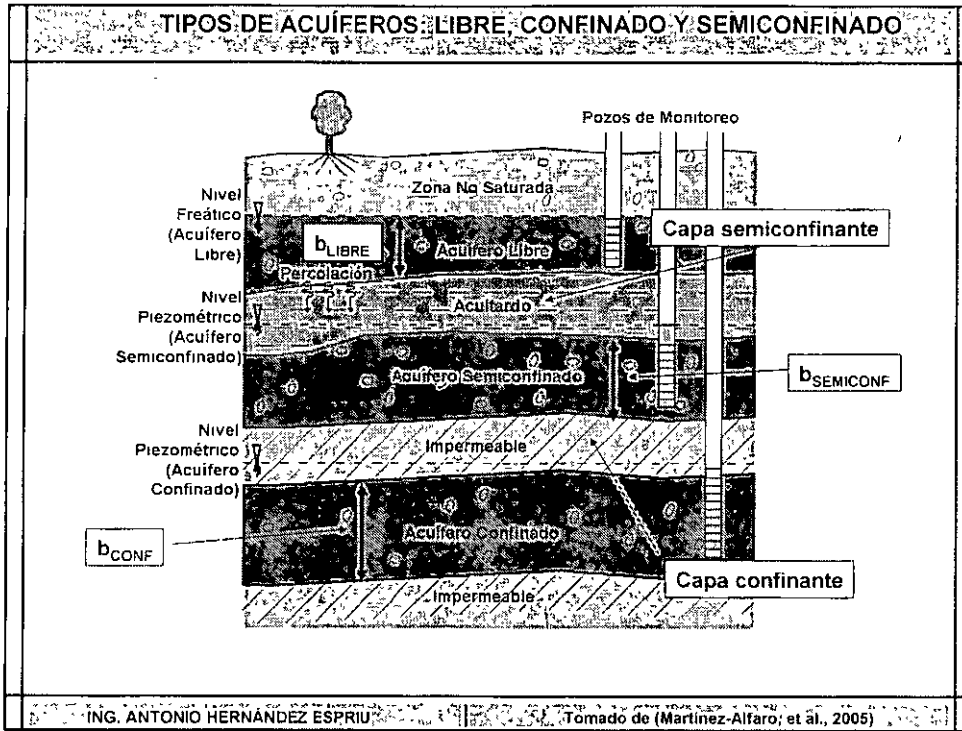
FUENTE: (API, 2004)

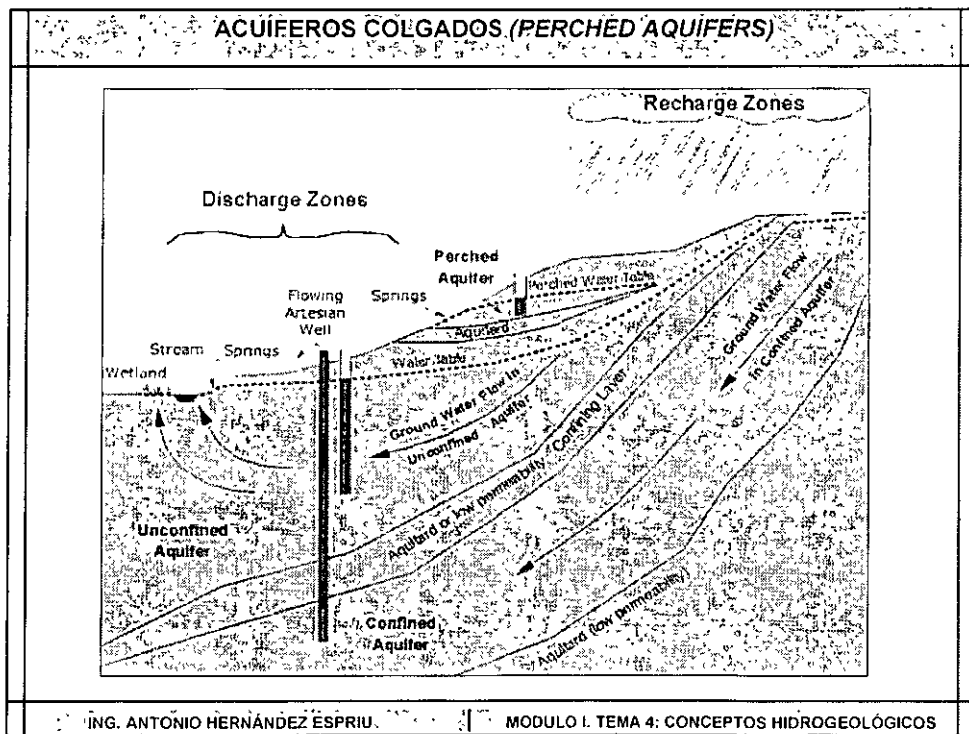
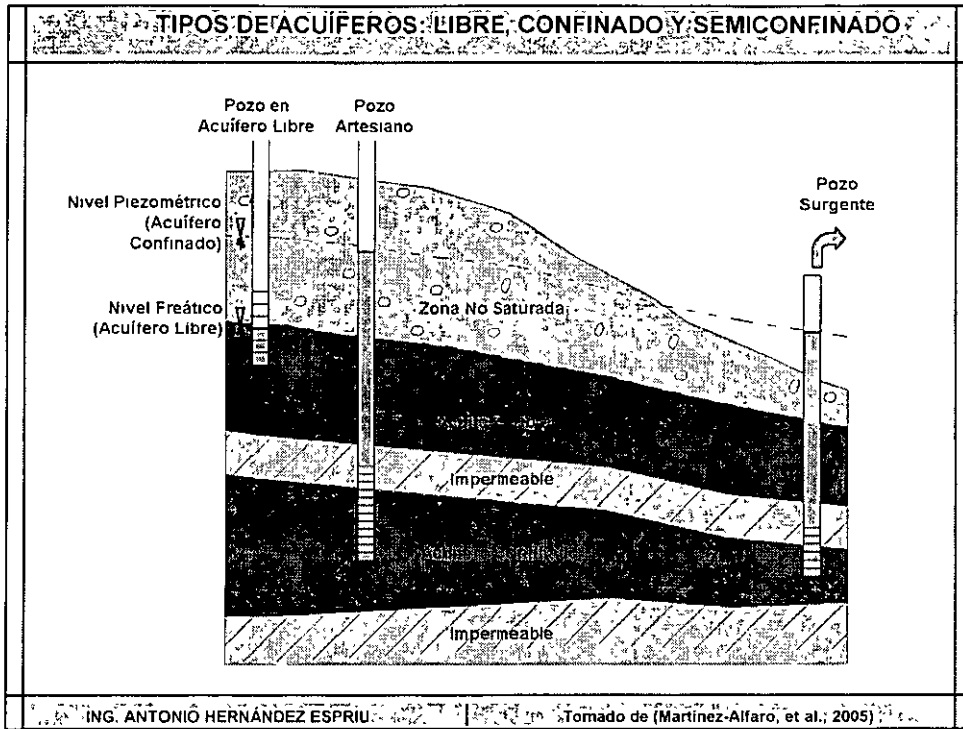
ZONA SATURADA: UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS		
Unidad Hidrogeológica	Definición	Ejemplos geológicos
Acuífero (del latín <i>fero</i>, llevar)	Formación geológica que almacena agua en cantidades significativas y permite su circulación en el subsuelo para aprovechamiento del hombre	Depósitos aluviales y deltaicos Areniscas, conglomerados, carbonatos karstificados, rocas cristalinas fracturadas
Acuitardo (del latín <i>tardo</i>, retardar)	Formación geológica que almacena agua en cantidades apreciables, pero la transmite muy lentamente	Arenas arcillosas, limos arcillosos, depósitos lacustres
Acuicludo (del latín <i>cludo</i>, encerrar)	Formación geológica que aun almacenando agua, su capacidad de transmisión es prácticamente nula	Rocas volcánicas y cristalinas muy poco fracturadas
Acuifugo (del latín <i>fugo</i>, rechazar)	Formación geológica que no almacena ni transmite agua	Rocas cristalinas sanas (granito, esquisto, gneiss, etc)

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

TIPOS DE ACUÍFEROS: LIBRE, CONFINADO Y SEMICONFINADO
<ul style="list-style-type: none"> • Acuífero libre (<i>Water-table aquifer</i>).- El límite superior de la zona saturada se denomina nivel o superficie freática, sometida a una presión equivalente a la atmosférica. En general, el nivel freático está influenciado por la topografía. La superficie freática, es una superficie real. • Acuífero confinado - Están sobreyacidos por capas confinantes que ocasionan que el agua esté sujeta a una presión mayor que la atmosférica. La superficie del agua se denomina piezométrica o potenciométrica, que por cierto, es una superficie virtual (nivel energético). Por tanto, aunque el nivel freático y piezométrico suelen utilizarse como sinónimos, NO LO SON. <p>Si un pozo totalmente penetrante, perfora la cima de un acuífero confinado, el agua ascenderá en el interior del pozo, hasta alcanzar un equilibrio entre la presión de poro y las presiones externas (es decir, el nivel piezométrico).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si la capa que sobreyace el acuífero es semiconfinante (permite cierto paso de agua en forma de goteo <i>-leaky factor-</i>), el acuífero se denominará semiconfinado.

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS





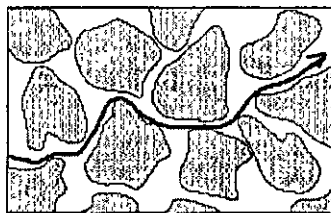
<h3>3. PROPIEDADES DE LOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS</h3>
<p>ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO 1. TEMA 4. CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS</p>

PROPIEDADES DE LOS SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS	
<p>(1) Relacionadas con la capacidad de retención y almacenamiento de agua de una unidad geológica,</p>	
<p>(2) Relacionadas con la capacidad de transmisión de agua de una unidad geológica.</p>	
CAPACIDAD DE RETENCIÓN Y ALMACENAMIENTO	CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN
<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad total • Porosidad eficaz • Retención específica • Rendimiento específico • Coeficiente de almacenamiento • Coeficiente específico 	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad intrínseca • Conductividad hidráulica • Transmisividad • Velocidad de Darcy • Velocidad real
<p>ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO 1. TEMA 4. CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS</p>	

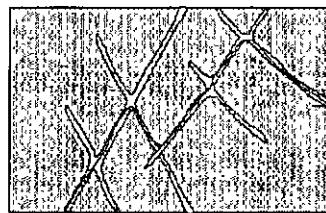
POROSIDAD TOTAL Y EFICAZ

- Los procesos diagenéticos y postdiagenéticos, ocasionan que las rocas contengan espacios vacíos entre clastos y granos, denominados, **poros**.
- La porosidad es la relación adimensional que existe entre el volumen de poro (V_p) y el volumen total de la formación geológica (V_T), de manera que:

$$\phi = \frac{V_p}{V_T} \cdot 100$$



Porosidad intergranular

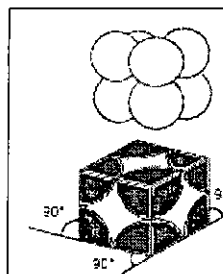


Porosidad por fracturación

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (Sán Román, J., 2005)

POROSIDAD TOTAL Y EFICAZ

- El empaque de la roca puede hacer cambiar drásticamente la porosidad



$$\phi = \frac{Vol\ cubo - Vol.\ esferas}{Vol\ cubo} = \frac{64r^3 - 8(4/3)\pi r^3}{64r^3} = 47.6\%$$

Emaque	Φ (%)
Cúbico	47.6
Romboedral	25.9
Ortorrómbico	39.54
...	...

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4. CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

POROSIDAD TOTAL Y EFICAZ		
Material	Φ_T (%)	Φ_{EF} (%)
Arcilla	45 - 60	1 - 8
Arenisca	15- 25	10 - 20
Grava suelta	25 - 35	12 - 27
Granito masivo	0 1 - 3	0.1 - 0.001
Escoria volcánica	25 - 60	2 - 20
Pizarra	5 - 12	1 - 5

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (Sara, 2003)

ALMACENAMIENTO EN UN ACUÍFERO LIBRE (S_y)

Extrayendo un volumen m_e hacemos descender la superficie freática 1 metro

Superficie freática

Acuífero libre

Impermeable

(b)

Rendimiento específico (Specific Yield; S_y)
 "VOLUMEN DE AGUA QUE CEDE UNA COLUMNA DE ACUÍFERO (DE BASE UNITARIA Y ALTURA EQUIVALENTE AL ESPESOR SATURADO) CUANDO EL NIVEL FREÁTICO DESCIENDE 1 UNIDAD"

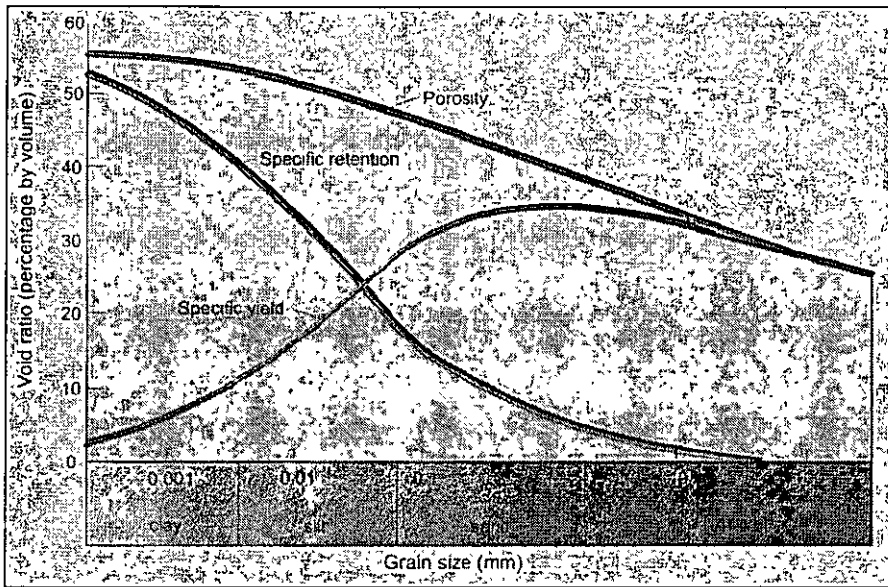
$$S_y = \Phi_{EF}$$

$$\Phi_T = S_y + S_r$$

$1\% < S_y < 20\%$
 $5\% < S_y < 15\%$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (San Román, J., 2005)

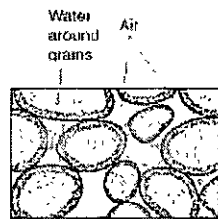
CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE UN ACUÍFERO LIBRE (Sy)



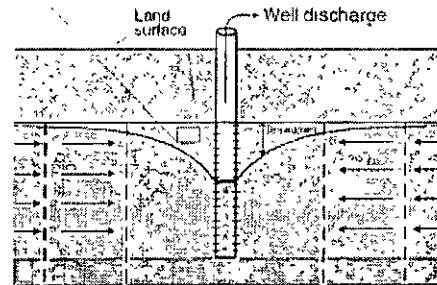
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: UK GROUNDWATER FORUM

CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE UN ACUÍFERO LIBRE (Sy)



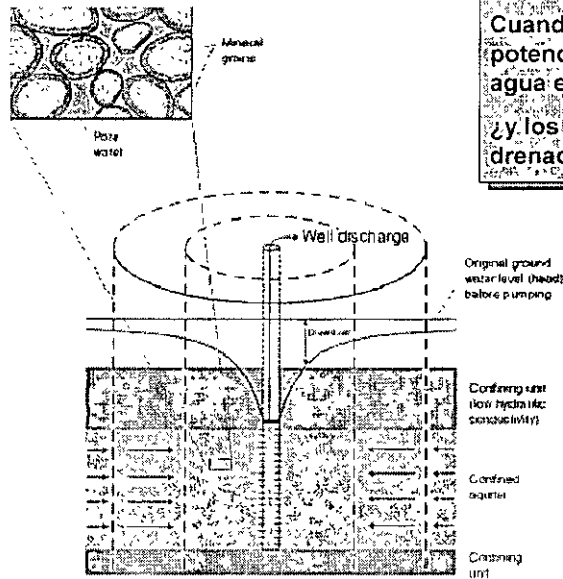
En un acuífero libre, el agua cedida proviene directamente del drenado físico de los poros interconectados



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (Bair & Lahm, 2006)

ALMACENAMIENTO EN UN ACUÍFERO CONFINADO Y SEMICONFINADO (S)

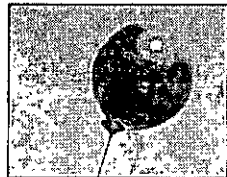


Cuando la superficie potenciométrica cambia, el agua es cedida, pero ¿y los poros no son drenados?

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (Bair & Lahm, 2006)

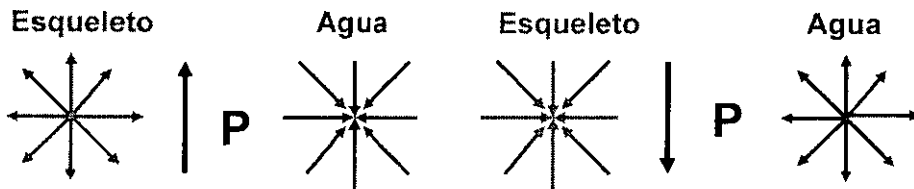
ALMACENAMIENTO EN UN ACUÍFERO CONFINADO Y SEMICONFINADO (S)

Pensemos en un sistema elástico de ALTA INGENIERÍA



Si la presión en el sistema elástico aumenta, la estructura sólida se expande y el fluido se contrae.
Si se libera la presión, la estructura sólida se contrae y el fluido se expande.

Un acuífero confinado, es un sistema elástico, y su estructura sólida se denomina "esqueleto del acuífero" (formación geológica)



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (Bair & Lahm, 2006)

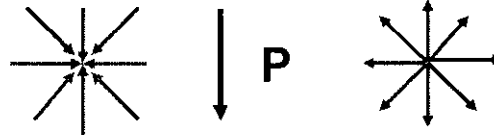
ALMACENAMIENTO EN UN ACUÍFERO CONFINADO Y SEMICONFINADO (S)

El bombeo en un acuífero confinado produce una disminución en la presión



Compactación del esqueleto

Expansión del Agua

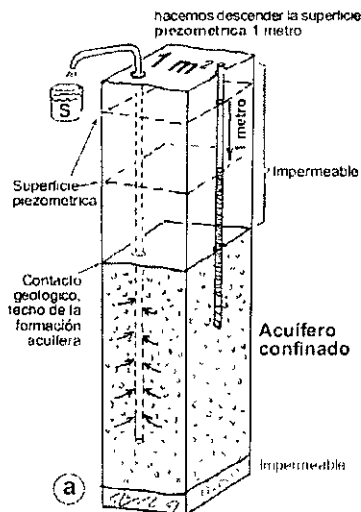


En un acuífero confinado, el agua extraída proviene de compactación (compresibilidad) del esqueleto sólido y de la expansión del agua

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (Bair & Lahm, 2006)

ALMACENAMIENTO EN UN ACUÍFERO CONFINADO (S)



Coefficiente de almacenamiento (S)

"CANTIDAD DE AGUA POR UNIDAD DE VOLUMEN QUE UNA COLUMNA UNITARIA DE ACUÍFERO PUEDE ALMACENAR O CEDER DEBIDO A LA COMPRESIBILIDAD DEL ESQUELETO SÓLIDO (MATRIZ) Y A LA DEL AGUA CONTENIDA EN LOS POROS, CUANDO EL NIVEL POTENCIOMÉTRICO DESCENDE 1 UNIDAD"

$$10^{-5} < S < 10^{-4}$$

También se utiliza "Coeficiente de almacenamiento específico, Ss"

Ss = S/b [L⁻¹], donde:
b: Espesor saturado

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (Sán Román, J ; 2005)

ALMACENAMIENTO EN UN ACUÍFERO CONFINADO (S)

- Definición matemática del coeficiente de almacenamiento:

$$S = \gamma b (\varphi_{ef} \beta + \alpha)$$

donde:

S = Coeficiente de almacenamiento (adim)

γ = Peso específico del agua (1000 kg/m³)

φ_{ef} = Porosidad eficaz (adim)

β : Coeficiente de compresibilidad del agua
 α : Coeficiente de compresibilidad del acuífero

- La cantidad de agua cedida, se debe en un 80-90% a la compresibilidad del acuífero.

A efectos del almacenamiento, un acuífero libre puede ceder mayor cantidad de agua que un acuífero confinado.

Sy: 0.01 a 0.20
 S: 10⁻⁴ a 10⁻⁵

COMPRESIBILIDAD DE MATERIALES GEOLÓGICOS (α)

Material	Coeficiente de compresibilidad (m ² /Kg)
Arcilla	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸
Lutita	10 ⁻⁹ a 10 ⁻¹⁰
Arena	10 ⁻⁷ a 10 ⁻⁹
Arenisca	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹¹
Caliza	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹¹
Roca cristalina	10 ⁻¹¹
Agua (β)	4.4 x 10 ⁻¹⁰

CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN
<ul style="list-style-type: none"> • En un medio poroso, el agua se desplazará de poro a poro interconectado, y través de medios fracturados o kársticos, lo hará a través de discontinuidades y cavidades de disolución • La conductividad hidráulica, k, es la capacidad que tiene el agua para atravesar un medio geológico, medida en unidades de velocidad [LT⁻¹]. • Aunque suelen utilizarse indistintamente, la permeabilidad (ki) y la conductividad hidráulica no son sinónimos. La permeabilidad (intrínseca) es la capacidad que tiene un medio geológico, para dejarse atravesar por un fluido cualquiera. Es por tanto un parámetro propio (intrínseco) del medio. • K tiene mucho más aplicación en la caracterización de la zona saturada, mientras que ki lo tiene para la zona no saturada. Ésta última se mide en la unidad "Darcy", donde: 1 Darcy ≈ 10⁻⁸ cm². Ki también tiene mucha aplicación en la Ingeniería Petrolera.
<small>ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO I TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS</small>

CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN
 <p style="text-align: center; font-weight: bold;">Poroso pero NO permeable</p>
<small>ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO I TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS</small>

CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN

- Ambas (K y Ki) se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$k_i = K \left(\frac{\mu}{\rho g} \right) \text{ donde:}$$

K_i : Permeabilidad intrínseca de la ZNS (cm^2)
 K : Conductividad hidráulica del suelo saturado (cm/seg)
 μ : Viscosidad del agua ($\text{g/cm}^2\text{seg}$)
 ρ : Aceleración de la gravedad (cm/seg^2)

- A 20°C , $\mu/\rho g = 1.02 \times 10^{-5} \text{ cm}^2\text{seg}$, por tanto.

$$k_i \approx 1.02 \times 10^{-5} K$$

CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN

- En efecto, k_i tiene más aplicación cuando se analiza la zona no saturada. Debido a que k_i representa la facilidad con la que un fluido atraviesa un medio geológico, es un parámetro que indica la potencial efectividad de sistemas de remediación que se basan en el principio de movilidad de fluidos, como la extracción de vapores en la zona no saturada.

Exhibit II-6 Intrinsic Permeability And SVE Effectiveness	
Intrinsic Permeability (k)	SVE Effectiveness
$k \geq 10^{-4} \text{ cm}^2$	Generally effective
$10^{-6} \geq k \geq 10^{-10} \text{ cm}^2$	May be effective; needs further evaluation.
$k < 10^{-10} \text{ cm}^2$	Marginal effectiveness to ineffective.

"How to evaluate alternative cleanup technologies for Underground Storage Tank Sites (UST)" – Chapter II Soil Vapor Extraction- (EPA, 2002)

CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN		
K (m/d)	Calificación cualitativa	Material geológico
$K < 10^{-2}$	Muy baja	Arcillas
$10^{-2} < K < 1$	Baja	Limos – arenas muy finas
$1 < K < 10$	Media	Arenas finas a medias
$10 < k < 100$	Alta	Arenas medias a gruesas
$K > 100$	Muy alta	Gravas, Karst

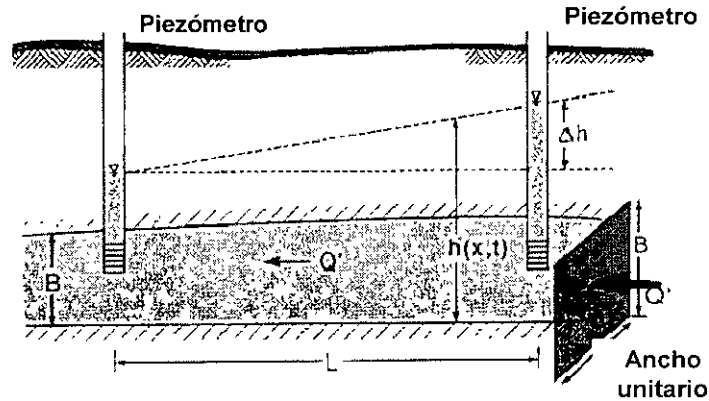
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS	
Parámetro	Método(s) de estimación
K (m/d)	Asociaciones litológicas, métodos granulométricos (Hazen), permeámetros, ensayos slug; pruebas de bombeo a caudal constante y variable (tanto en la etapa de abatimiento como en la recuperación), ensayos slug, ensayos de trazadores
Ki (cm ²)	Asociaciones litológicas y granulométricas, ecuaciones a partir de K
T (m ² /d)	Asociaciones litológicas y datos estratigráficos (b); pruebas de bombeo a caudal constante y variable (tanto en la etapa de abatimiento como en la recuperación), ensayos slug; ensayos de trazadores
S, Sy, Ss (adim)	Pruebas de bombeo a caudal constante y variable con pozo de observación (solo en la etapa de abatimiento), ensayos slug por el método de Cooper-Papadopulos
dh/dL (m/m)	Datos piezométricos y nivelación topográfica de pozos, configuración potenciométrica; métodos matemáticos
V _x (m/d)	Ley de Darcy; ensayo de trazadores (principalmente dilución puntual)

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

TRANSMISIVIDAD EN ACUÍFEROS

- Se define como "Medida de la capacidad de un acuífero de transmitir agua horizontalmente a través de una unidad hidrogeológica de ancho unitario, a través de todo el espesor saturado de la unidad, bajo un gradiente hidráulico unitario". (NO USAR TRANSMISIBILIDAD).



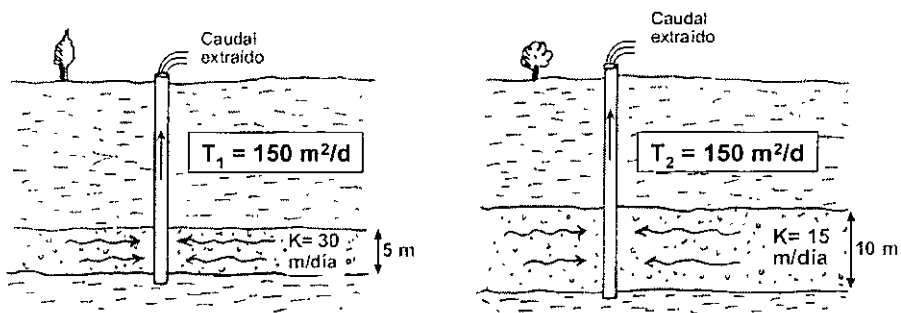
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

TRANSMISIVIDAD EN ACUÍFEROS

- Es el parámetro de mayor importancia en relación con el caudal que se puede obtener de un pozo. Matemáticamente se define como:

$$T = Kb \text{ [L}^2\text{T}^{-1}\text{]}; \text{ [m}^2\text{/d]}$$



- En pozos parcialmente penetrantes, T se estima de la siguiente manera:

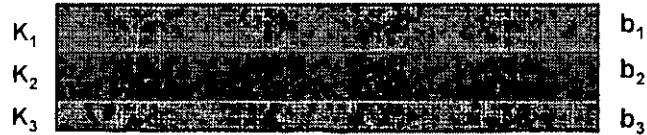
$$T = K\lambda, \text{ donde } \lambda: \text{ Penetración del pozo en el acuífero (m).}$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (San Román, J., 2005)

TRANSMISIVIDAD EN ACUÍFEROS

- En un sistema multi-acuíferos, es posible obtener la transmisividad equivalente mediante la suma de las transmisividades individuales



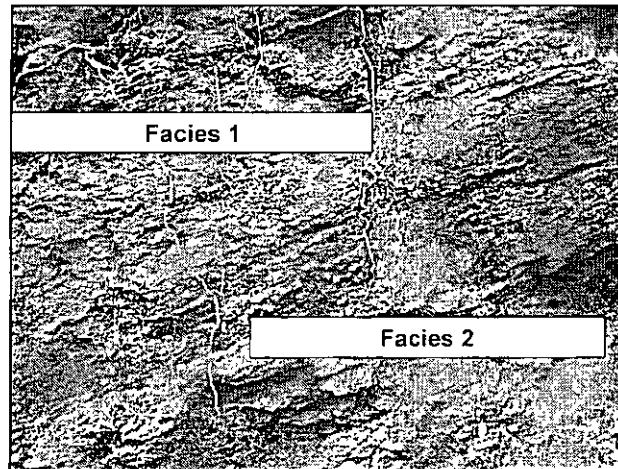
$$T_{eq} = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} k_n \cdot b_n$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (San Román, J., 2005)

HOMOGENEIDAD vs HETEROGENEIDAD

- En unidades geológicas donde **existen varias capas** (principalmente en ambientes sedimentarios), cada una puede ser homogénea entre sí, sin embargo el conjunto del sistema se vuelve **heterogéneo (por ejemplo un cambio de facies)**; en términos hidrogeológicos, la conductividad hidráulica varía de un punto a otro



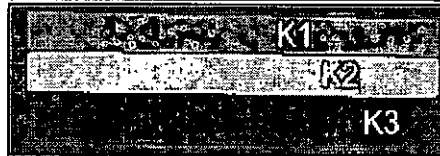
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (San Román, J., 2005)

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EQUIVALENTE

Heterogeneidad: k varía de un punto a otro.
Anisotropía: $k_x \neq k_y \neq k_z$

CAMBIO VERTICAL DE FACIES



$$k_{heq} = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{k_{hn} \cdot b_n}{b}$$

CAMBIO LATERAL DE FACIES



$$k_{veq} = \frac{b}{\sum_{m=1}^{m \rightarrow \infty} \frac{b_m}{k_{vm}}}$$

**DIPLOMADO EN:
"CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS
CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS"**

**Módulo I: Fundamentación teórica
Tema 4: Conceptos hidrogeológicos**

**ING. GEÓLOGO ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU
PROFESOR DE TIEMPO COMPLETO DEL ÁREA DE HIDROGEOLOGÍA Y
GEOLOGÍA AMBIENTAL.**

Departamento de Geología División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra Facultad de
Ingeniería, UNAM.

ahespriu@dictf.unam.mx
www.dict.unam.mx

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU · MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

**4. Hidráulica de acuíferos (flujo en medios
porosos):**

- Movimiento y desplazamiento
- Caudal a través de medios porosos
 - Velocidades
 - Direcciones
- Ecuación general de flujo

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU · MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

FLUJO EN MEDIOS POROSOS (MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA)	
<ul style="list-style-type: none"> • El agua subterránea se mueve (y por lo tanto los contaminantes disueltos en ella) debido a fuerzas que producen energía mecánica, térmica y química. • Debido a las variaciones espaciales de esa energía a escalas regionales, el agua subterránea se mueve para eliminar esas diferencias energéticas. • Existen de manera general, 3 fuerzas que actúan sobre el agua subterránea: <ul style="list-style-type: none"> • Fuerza de gravedad • Fuerzas externas (presiones como la atmosférica y la litostática). • Atracción molecular (agua adherida a superficies sólidas). 	
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU	MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

FLUJO EN MEDIOS POROSOS (MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA)	
<ul style="list-style-type: none"> • Energía total (E_T) = Energía mecánica (E_M) + Presiones externas (P) • $E_T = E_M + P$; a su vez: • $E_M = E_C + E_p$, donde $E_C = \frac{1}{2} mv^2$ y $E_p = mgz \rightarrow E_T = \frac{1}{2} mv^2 + mgz + P$. (1) • Para un fluido de volumen unitario ($vol = 1$; masa (m) = densidad (ρ) = 1). • Sustituyendo ρ por m en la ecuación (1): • $E_T = \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gz + P$. . (2). Dividiendo (2) entre "ρ" • $\frac{1}{2} v^2 + gz + (P/\rho) = \text{Constante}$. (Ecuación de Bernoulli). 	
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU	MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

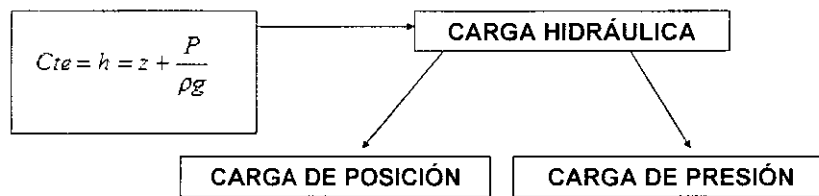
FLUJO EN MEDIOS POROSOS (MÓVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA)

• A su vez la Ecuación de Bernoulli se divide entre "g".

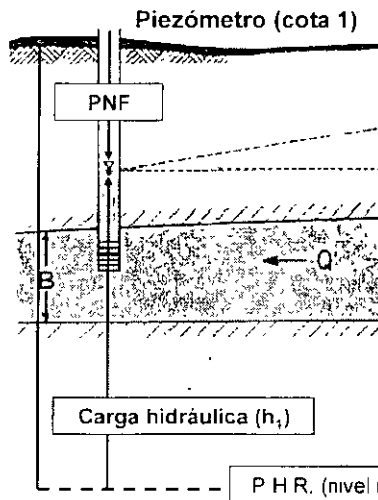
$$Cte = \frac{1}{2g} v^2 + z + \frac{P}{\rho g} \dots (3)$$

Como el agua subterránea se mueve muy lentamente

$$\frac{1}{2g} v^2 \approx 0, \text{ por lo tanto.}$$

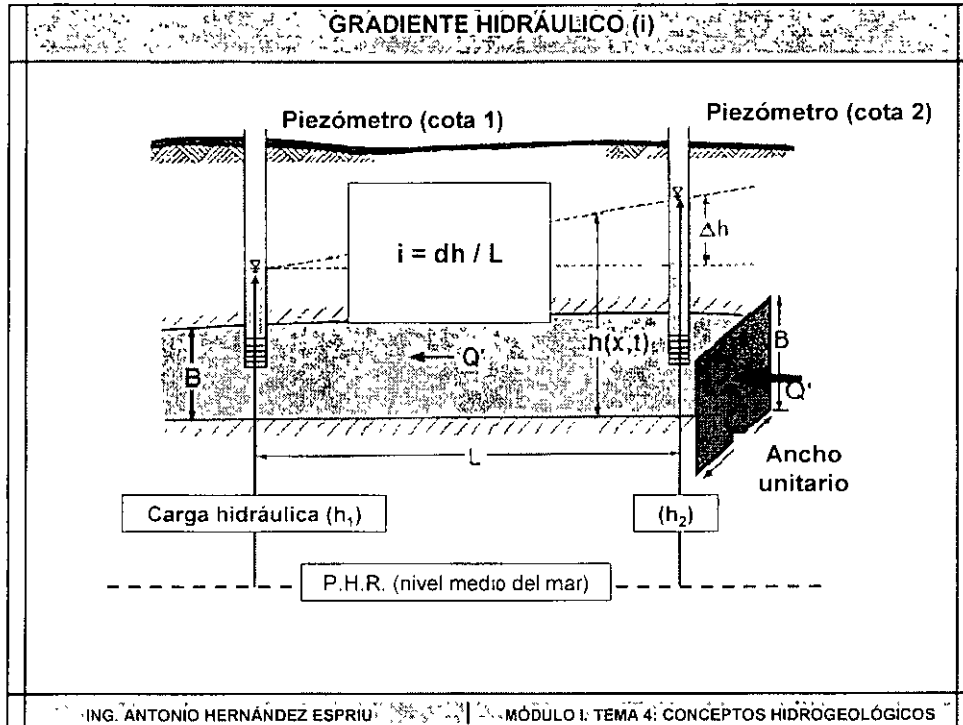


CARGA HIDRÁULICA O POTENCIAL HIDRÁULICO (h)




$$h = \text{Cota 1} - \text{PNF [msnm]}$$

El agua subterránea se mueve de mayor a menor carga hidráulica



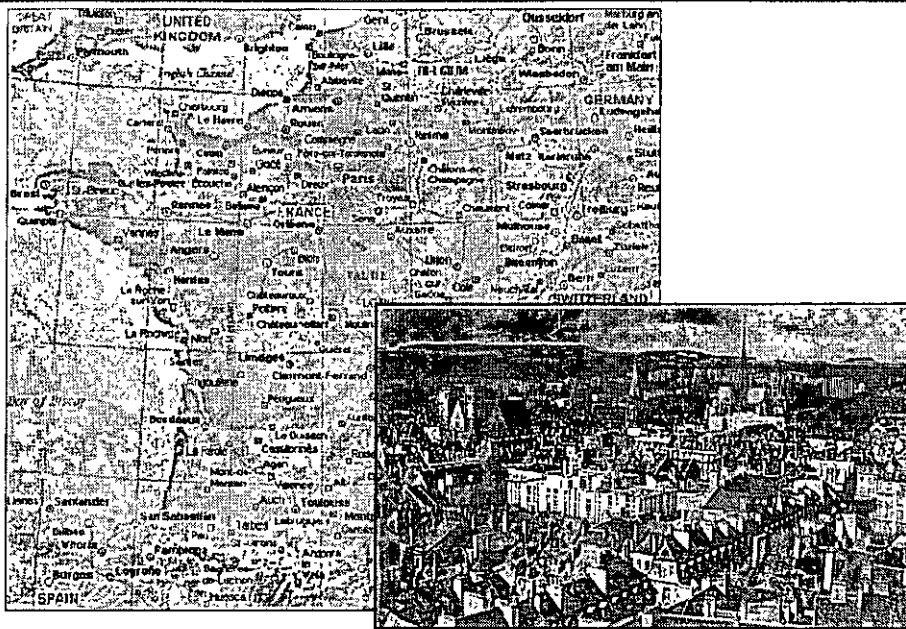
EXPERIMENTO Y LEY DE DARCY

- **Henry Darcy, Ingeniero civil (hidráulico) francés,** nació en Dijon, Francia
- Entre 1834 a 1840, se ocupa por encargo de la **Municipalidad de Dijon**, del sistema de construcción y abastecimiento de agua potable, consistente en una **línea subterránea de conducción de 12 km**, generando en esa época, que Dijon fuera la segunda ciudad europea a la vanguardia del abastecimiento de agua potable, después de Roma.
- En 1856 publica un libro llamado: **"The Public Fountains of the city of Dijon"**. El libro contiene un anexo referido a la estimación del caudal a través de arenas, caracterizado por medio de un experimento que derivó en una ley empírica, conocida hoy en día como **Ley de Darcy**, de gran aplicación y vigencia en la actualidad.



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

EXPERIMENTO Y LEY DE DARCY



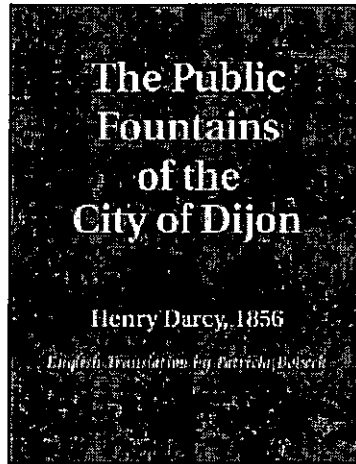
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

EXPERIMENTO Y LEY DE DARCY

LE 30 MAI 2006, L'ASSOCIATION
INTERNATIONALE DES HYDROGÉOLOGUES
CÉLÉBRANT SON 50^{ÈME} ANNIVERSAIRE,
A RENDU HOMMAGE EN PRÉSENCE DE
FRANÇOIS REBSAMEN, MAIRE DE DIJON,
A HENRY DARCY QUI FORMULA A DIJON
EN 1856, LA LOI D'ÉCOULEMENT DES EAUX
SOUTERRAINES APPLIQUÉE PAR LES
HYDROGÉOLOGUES DU MONDE ENTIER.
LE COMITÉ FRANÇAIS D'HYDROGÉOLOGIE

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

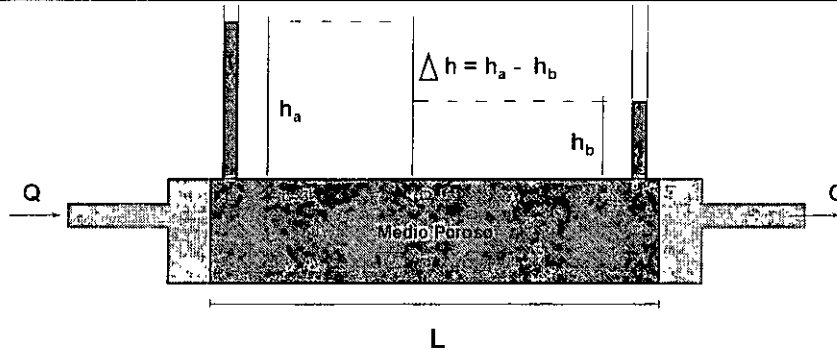
EXPERIMENTO Y LEY DE DARCY



Libro editado por la NGWA

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I | TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

EXPERIMENTO Y LEY DE DARCY



- Darcy investigó el flujo de agua (caudal) a través de un tubo de arena.
- En el experimento, Darcy varió:
 - El diámetro (sección de paso) del tubo (A)
 - El caudal de entrada ($Q = \text{volumen} / \text{tiempo}$)
 - Material poroso en el tubo (K)
 - Posición de los “piezómetros”

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I | TEMA 4. CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

EXPERIMENTO Y LEY DE DARCY

- A través del experimento, Darcy determinó que:

- A mayor diámetro del tubo (sección de paso perpendicular al flujo), Q es mayor.
- Existe una diferencia de alturas de agua (h), medidas en los "piezómetros", tanto en la entrada como a la salida del tubo.
- A una mayor diferencia de alturas ($h_{ENT} - h_{SAL}$), corresponde un aumento de Q .

- Experimentalmente, demostró que:

$$Q \propto A \left(\frac{h_{ENT} - h_{SAL}}{L} \right)$$

La proporcionalidad (α) se elimina agregando una constante que depende del medio poroso (K).

EXPERIMENTO Y LEY DE DARCY

- La ecuación anterior se enuncia como **LEY DE DARCY**:

$$Q = KA \left(\frac{dh}{dL} \right)$$

- Siendo:

Q : Caudal de flujo subterráneo [L^3T^{-1}]; [L/seg; m^3/d]

A : Sección de paso PERPENDICULAR al flujo [L^2]; [m^2]

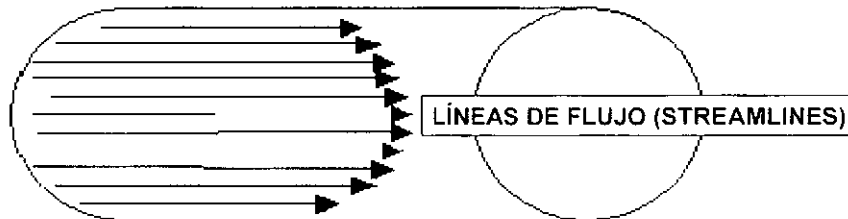
dh/dl : Gradiente hidráulico [LL^{-1}]; [adim] = i

$$Q = KAi$$

VALIDEZ DE LA LEY DE DARCY

$$Q = KA I$$

- Cuando un fluido se mueve, existe una resistencia al flujo denominada **viscosidad**.
- Flujos lentos son dominados por la viscosidad. Como consecuencia, el nivel energético es bajo, y se crea un **flujo laminar**.



VALIDEZ DE LA LEY DE DARCY

- Cuando la velocidad se incrementa, la **energía cinética es mayor que la viscosidad**.
- Esto genera que las partículas de agua se aceleren unas contra otras de una manera **errática**.
- La resultante es un **flujo turbulento**, donde no se identifican líneas de flujo.



VALIDEZ DE LA LEY DE DARCY

- En Hidráulica, se utiliza el **Número de Reynolds (Re)**, que relaciona 4 factores para determinar si el flujo es laminar o turbulento:

$$Re = \frac{\rho \cdot q \cdot d}{\mu}$$

d: Diámetro del canal o tubería (m)

q: Velocidad de descarga (m/seg)

- Para canales abiertos, d es el diámetro

- En estos casos, la transición entre el flujo laminar y turbulento ocurre a una velocidad lineal donde $Re > 2000$ [adim].

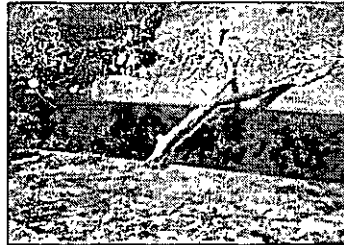
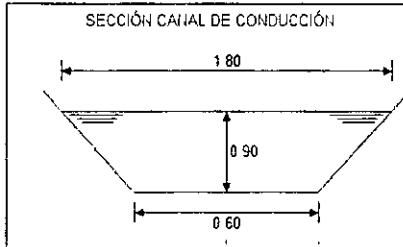
VALIDEZ DE LA LEY DE DARCY

- En medios porosos, es complicado estimar "d", y suele utilizarse el diámetro promedio de grano, en lugar del diámetro promedio del poro.
- En acuíferos, prácticamente no existen flujos turbulentos que indicarian para el agua subterránea $60 < Re < 600$.
- Sin embargo, se ha determinado que la Ley de Darcy es válida para velocidades lineales donde $1 < Re < 10$, para la gran mayoría de los acuíferos (Fetter, 2003).

VELOCIDAD DE FLUJO SUBTERRÁNEO

- En aguas superficiales, la velocidad se relaciona por medio de.

Q = vA; donde v: velocidad; A: Sección del canal



VELOCIDAD DE FLUJO SUBTERRÁNEO

- Igualando la expresión anterior y la Ley de Darcy.

$$vA = \frac{k}{\mu} \Delta h;$$

$$V = Ki = K(dh/dL)$$

- La expresión anterior se conoce como “velocidad de Darcy”
- La velocidad de Darcy, NO es la velocidad real de flujo. Ésta se obtiene dividiendo la velocidad de Darcy entre la porosidad eficaz, es decir:

$$V_x = \frac{k}{\phi_{ef}} \cdot \frac{dh}{dl} \longrightarrow \text{VELOCIDAD ADVECTIVA}$$

ENSAYOS DE TRAZADORES	
	<ul style="list-style-type: none"> • Una metodología para estimar la velocidad de flujo a partir de una prueba en campo (poco utilizada en México) que es el ensayo de dilución puntual. • Los ensayos de dilución puntual, forman parte de los ensayos de trazadores, definiendo como trazador. "materia (generalmente artificial) transportada por las aguas subterráneas, que permite obtener información sobre la dirección, velocidad de flujo, y parámetros de transporte de contaminantes". • Un trazador ideal (soluta conservativo) es aquel que: <ul style="list-style-type: none"> • Se mueve a la velocidad del flujo subterráneo (Retardo = 1) • No se biodegrada • No precipita • Añadido al agua, no se alteran sus propiedades físico-químicas • Ni tampoco altera las condiciones físico-químicas del acuífero
<p>ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: CIHS-38</p>	

ENSAYOS DE TRAZADORES	
	<ul style="list-style-type: none"> • Ejemplos de trazadores: Cl⁻; ³H, Y, colorantes artificiales (para karst), etc • Existen una gran variedad de ensayos de trazadores: <ul style="list-style-type: none"> • En pozo único (de extracción e inyección) • En pozos múltiples (en flujo natural, convergente, divergente, etc.). • Con inyección instantánea o continua • . • El ensayo de dilución puntual sirve para <ul style="list-style-type: none"> • Estimar la velocidad horizontal de flujo en el acuífero • Caracterizar posibles flujos verticales • Determinar los parámetros hidráulicos • Determinar diferencias de k en la vertical
<p>ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: CIHS-38</p>	

ENSAYOS DE TRAZADORES

- El ensayo consiste en inyectar un trazador a una concentración C_0 en el tramo L (ranurado) de un piezómetro de diámetro d , tal que, se inyecte el trazador disuelto en un volumen (V_0):

$$V_0 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L$$

- El trazador UNIFORMEMENTE repartido en el tramo ranurado del sondeo, se mide a diferentes profundidades por intervalos de tiempo.
- La velocidad del flujo irá “diluyendo” la concentración del trazador, de manera que las curvas de dilución servirán para interpretar la velocidad de flujo subterráneo, de manera que:

$$V' = \frac{\pi d}{4\alpha t} \ln\left(\frac{C_0}{C}\right) \quad \boxed{V' = \text{Velocidad de Darcy}}$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: CIHS-38

ENSAYOS DE TRAZADORES

- Se introduce el término “ α ” denominado “piel del sondeo”, el cual genera perturbaciones sobre la velocidad del agua. Es por tanto un coeficiente de corrección, de manera que:

- Si k_1 es la conductividad hidráulica alrededor del sondeo
- k_2 es la conductividad hidráulica del prefiltro de grava sílica
- k_3 es la conductividad hidráulica del acuífero
- r_1 es el radio interno del tubo del sondeo
- r_2 es el radio externo del sondeo
- r_3 es el radio del sondeo más el prefiltro (perforación)

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{k_3}{k_2}\right) \left[1 + \frac{r_1^2}{r_2^2} + \frac{k_2}{k_1} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right)\right] + \left(1 - \frac{k_3}{k_2}\right) \left[\frac{r_1^2}{r_3^2} + \frac{r_2^2}{r_3^2} - \frac{k_2}{k_1} \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} - \frac{r_2^2}{r_3^2}\right)\right]}$$

- Para fines de aproximación, se utiliza $\alpha \approx 2$.

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: CIHS-38

Ensayo de dilución puntual en acuífero calizo, Tarragona, Barcelona

Horas/actividad (Cu/seg) del ¹³¹Y (Tiempo de vida media = 6 días)

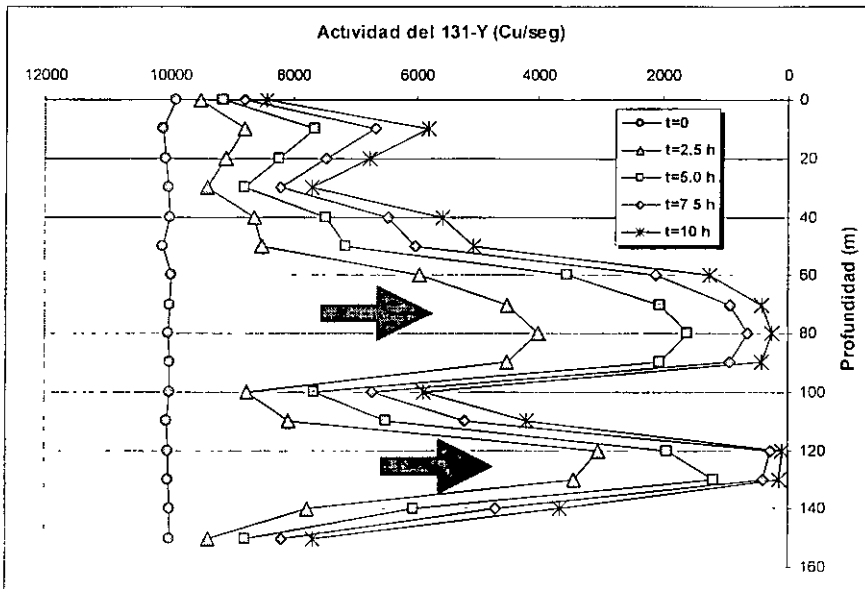
Se midió con ayuda de un registro geofísico de pozo tipo Gamma-Natural

Profundidad (m)	t=0	t=2.5 h	t=5.0 h	t=7.5 h	t=10 h
0	9900	9514	9143	8786	8443
10	10112	8797	7654	6659	5793
20	10050	9098	8237	7457	6751
30	10023	9380	8778	8215	7688
40	9988	8632	7460	6448	5572
50	10101	8501	7155	6022	5068
60	9963	5940	3541	2111	1258
70	9978	4502	2032	917	414
80	10013	4010	1606	643	258
90	9994	4510	2035	918	414
100	9986	8746	7659	6708	5875
110	10036	8063	6479	5205	4182
120	10002	3032	1919	279	84
130	10021	3423	1169	399	136
140	9982	7758	6030	4687	3643
150	10000	9358	8758	8196	7670

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: CIHS-38

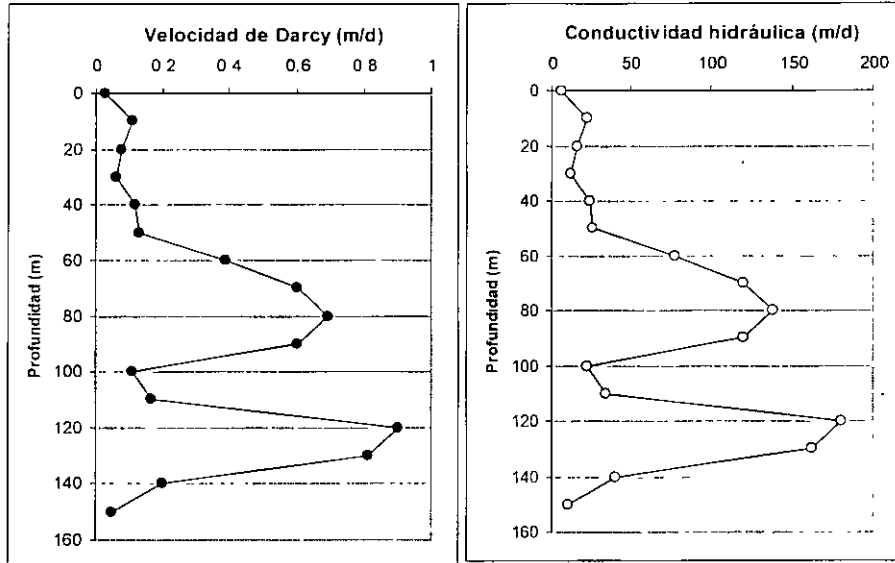
Ensayo de dilución puntual en acuífero calizo, Tarragona, Barcelona



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: CIHS-38

Ensayo de dilución puntual en acuífero calizo, Tarragona, Barcelona



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: CIHS-38

CONFIGURACIONES POTENCIOMÉTRICAS

- Una red de flujo, es una representación gráfica del movimiento del agua subterránea.
- Está representada por diversos elementos:
 - Líneas de flujo o de corriente, representadas por líneas imaginarias que indican la trayectoria de las partículas de agua subterránea a través de un acuífero.
 - Líneas equipotenciales o ISOPIEZAS, que son líneas imaginarias que unen PUNTOS DE IGUAL CARGA HIDRÁULICA. Representan líneas en las que el agua subterránea tiene la misma energía en todos sus puntos.

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS.

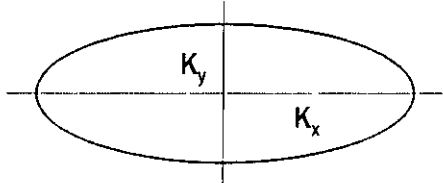
CONFIGURACIONES POTENCIOMÉTRICAS

- El gradiente hidráulico indica la dirección en la que se produce el máximo cambio de energía entre cada dos equipotenciales.
- La representación gráfica, se realiza de modo que las líneas de flujo **CRUCEN PERPENDICULARMENTE** las líneas equipotenciales, suponiendo para ello que el acuífero es isótropo y homogéneo.
- Si existiese anisotropía en el plano de flujo, entonces las líneas de flujo cruzarían las equipotenciales en un ángulo menor a los 90° , dictado por el grado de anisotropía, y la orientación del gradiente con respecto al elipsoide de la conductividad hidráulica

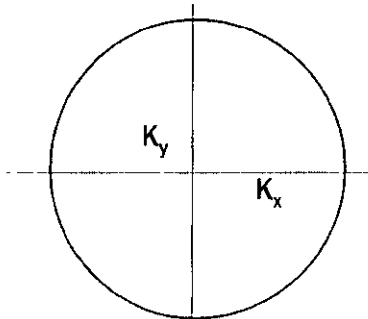
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

CONFIGURACIONES POTENCIOMÉTRICAS

Medio homogéneo y anisótropo



Medio homogéneo e isótropo

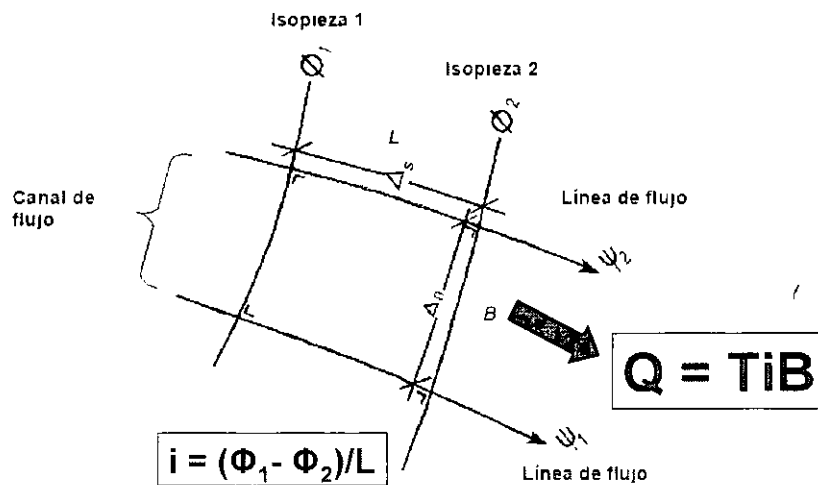


ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

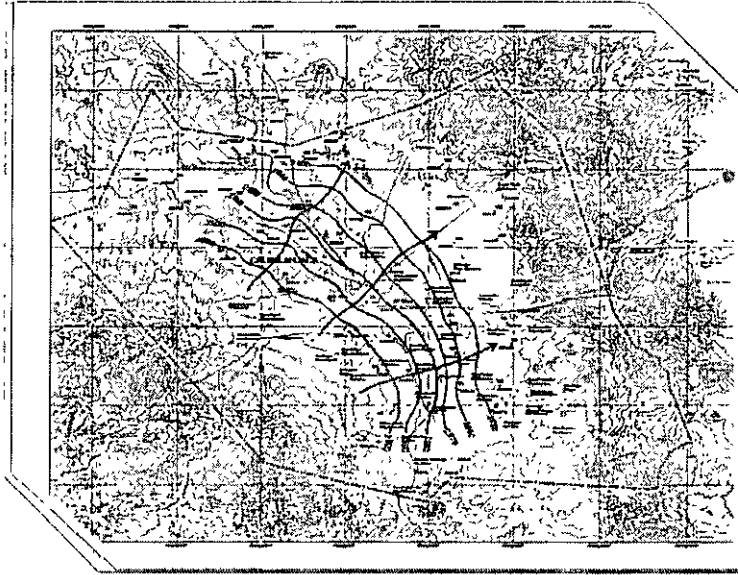
CONFIGURACIONES POTENCIOMÉTRICAS

- El método para la construcción de una red de flujo supone lo siguiente:
 - El acuífero es homogéneo
 - El acuífero está totalmente saturado
 - El acuífero es isotrópico
 - El esqueleto sólido y el agua son incompresibles
 - Existe flujo laminar, y es válida la ley de Darcy
 - Todas las condiciones de frontera son conocidas

CONFIGURACIONES POTENCIOMÉTRICAS

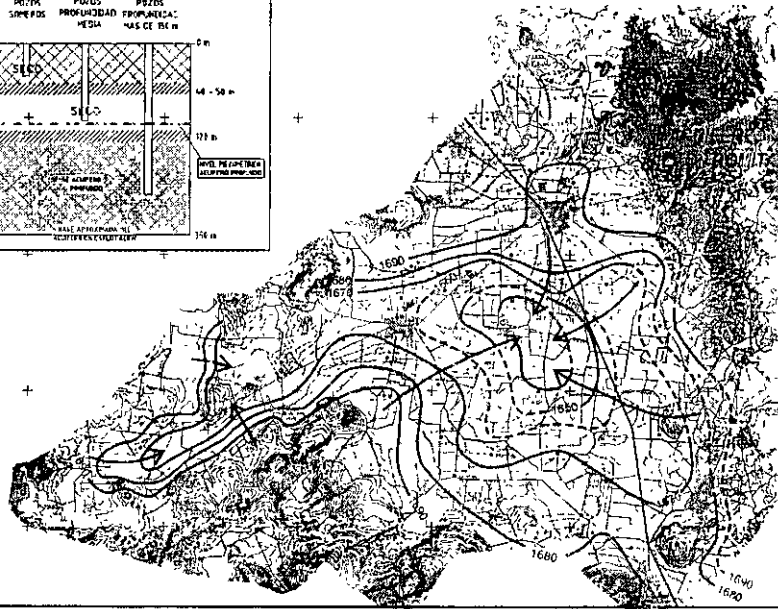
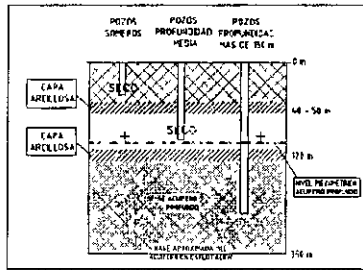


CONFIGURACIONES POTENCIOMÉTRICAS

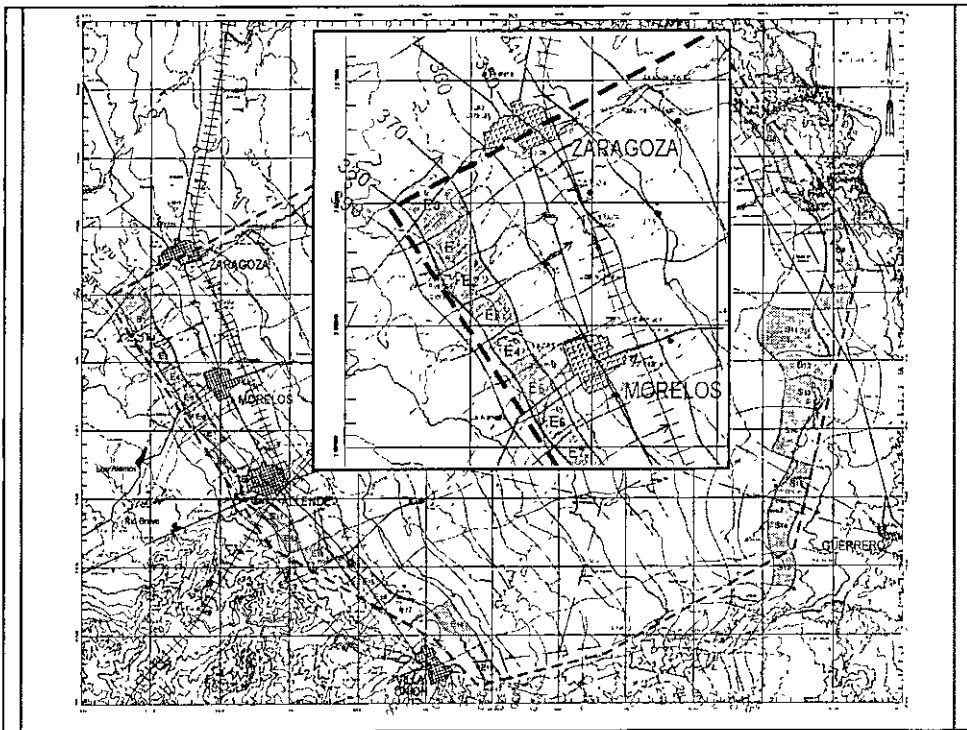
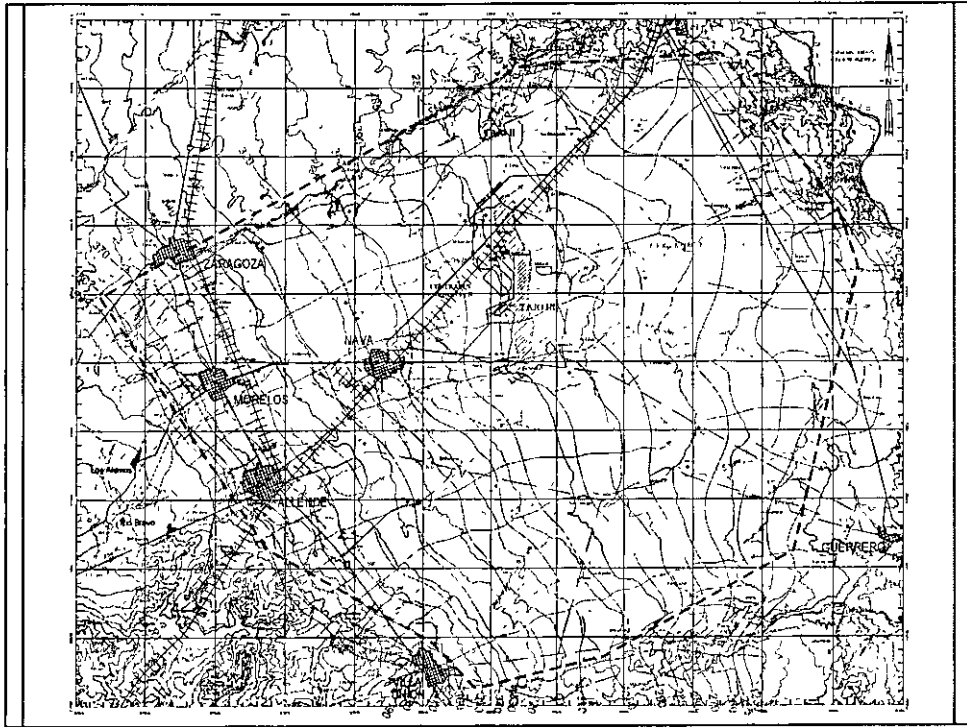


ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: COPEI Ingeniería, SA de CV

CONFIGURACIONES POTENCIOMÉTRICAS



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: Comisión Estatal del Agua de Guanajuato



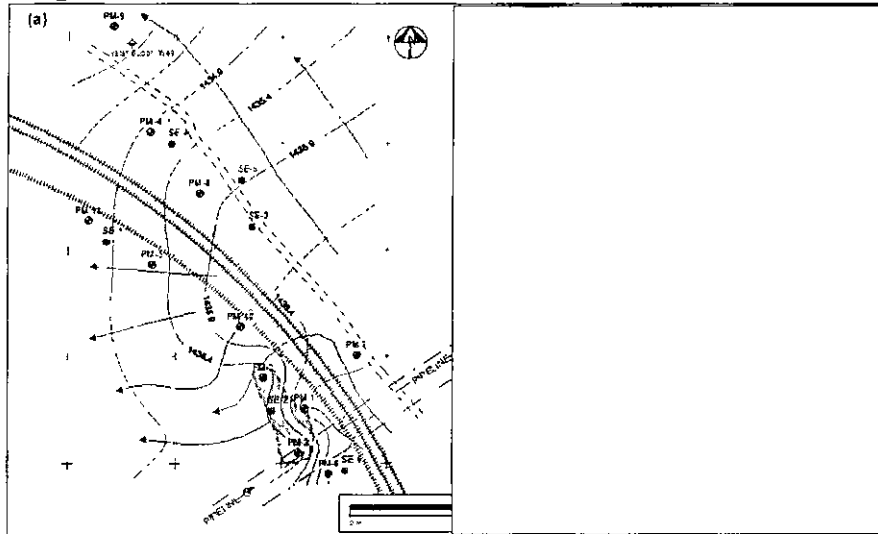
CÁLCULO DE ENTRADAS Y SALIDAS SUBTERRANEAS

CAUDAL DE ENTRADA POR FLUJO SUBTERRANEO (EN) 2006										
No	Tubo	Gradiente hidráulico i			T (m ² /día)		Ancho del tubo B- (m)	Q entrada (m ³ /día)		
		Q2 (m ³ /mm)	Q1 (m ³ /mm)	L (m)	i (m/m)	F (m ² /día)				
5	E0	380	370	2582.77	0.0039	427.00	13.50	1048.89	23410.24	
6	E1	380	370	2717.37	0.0037	427.00	13.50	1426.44	30238.61	
7	E2	380	370	3047.05	0.0033	134.00	13.50	1493.29	8863.14	
8	E3	380	370	2586.11	0.0039	257.33	13.50	1597.9	21465.08	
9	E4	380	370	2199.03	0.0045	257.33	13.50	2245.23	35489.66	
10	E5	380	370	2805.9	0.0034	257.33	13.50	1345.35	16083.64	
11	E6	380	370	2638.79	0.0038	257.33	13.50	1724.41	22702.07	
12	E7	380	370	2874.55	0.0035	160.50	13.50	1448.46	10925.60	
13	E8	390	380	3068.85	0.0033	110.00	13.50	1430.25	6820.90	
14	E9	380	370	2920.93	0.0034	110.00	13.50	1437.93	7208.75	
15	E10	380	370	2729.81	0.0037	30.40	13.50	1389.4	2103.86	
16	E11	380	370	2618.18	0.0038	94.75	13.50	1899.91	6277.22	
17	E12	380	370	2833.58	0.0035	70.20	13.50	2101.66	7029.12	
18	E13	370	360	3084.6	0.0033	56.00	13.50	1929.22	4759.15	
19	E14	360	350	3242.78	0.0031	28.70	13.50	1651.04	1972.98	
20	E15	380	350	3254.6	0.0031	89.67	13.50	1558.84	5797.87	
21	E16	360	350	2824.73	0.0035	30.40	13.50	1997.03	2901.45	
22	E17	360	350	2125.6	0.0047	25.40	13.50	2085.22	3364.02	
23	E18	250	340	1597.41	0.0063	24.30	13.50	2259.56	4640.30	
24	E19	250	340	1560.05	0.0064	23.70	13.50	1375.37	2820.74	
25	E20	350	340	1438.36	0.0070	23.70	13.50	1468.29	3261.63	
26	E21	350	340	1232.04	0.0081	23.70	13.50	1391.86	3614.54	
27	E22	350	340	1479.4	0.0068	23.70	13.50	1811.13	3484.39	
28	E23	350	340	1481.51	0.0067	23.70	13.50	1571.64	3394.12	
Entradas subterráneas totales (2006)									241709.04	m ³ /día
Retornos por flego (R0) 2002									88.22	m ³ /día

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

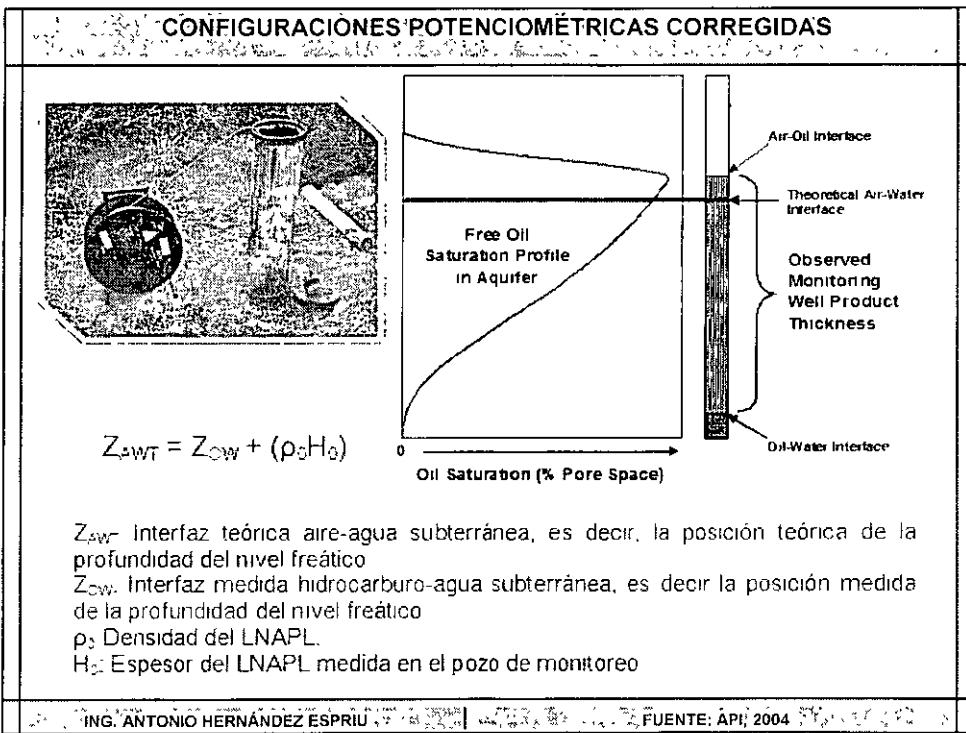
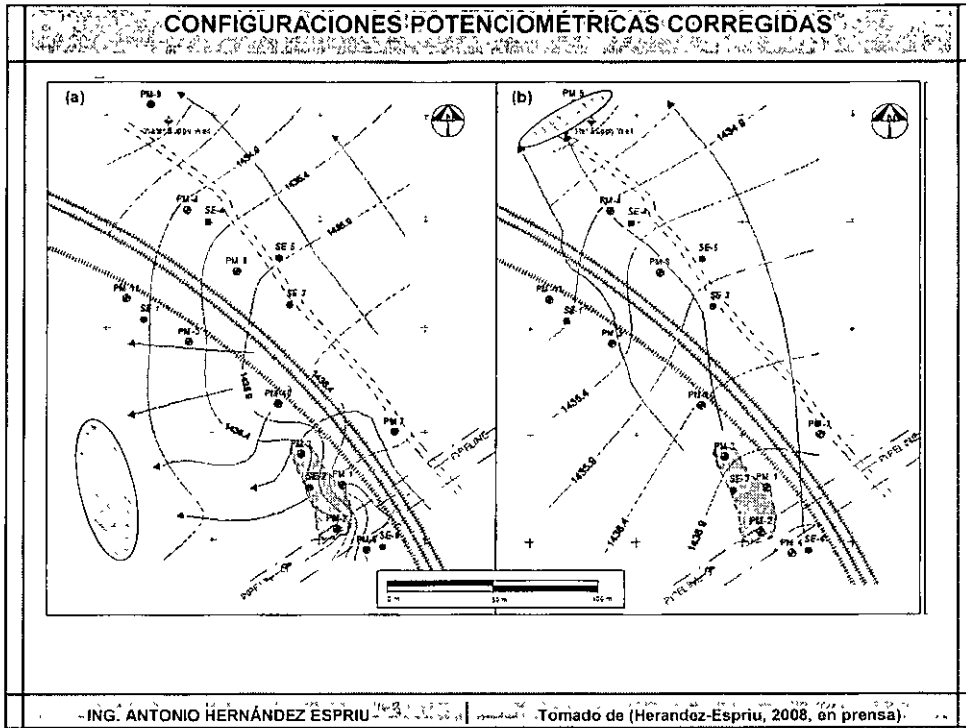
FUENTE: COPEI Ingeniería, SA de CV

CONFIGURACIONES POTENCIOMÉTRICAS CORREGIDAS



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (Herández-Espru, 2008, en prensa)



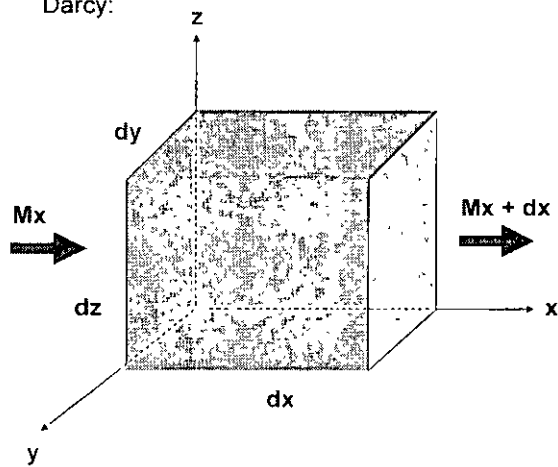
5. Ecuación General de Flujo

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO 1: TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO (MEDIO ISOTRÓPICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO)

- Partimos de un elemento infinitesimal del acuífero, denominado **volumen de control**, orientado en el espacio por los ejes cartesianos y aplicamos un balance de flujo másico en el TIEMPO (dt) por medio de la Ley de Darcy:



$$Q = AKi = Av$$

$$A = dydz$$

$$Mx = (dydz) * v_x * \rho_{\text{agua}} * dt$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO (MEDIO ISOTRÓPICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO)

- En el mismo instante pero en la cara opuesta, sale un flujo másico tal que:

$$M_{(x+dx)} = (dydz) \cdot v_{(x+dx)} \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot dt$$

- La diferencia entre la masa que entra y la masa que sale es igual (ΔM_x) Esta diferencia expresada en la 1ra Ley de la Termodinámica (conservación de la masa), fue resuelta por el modelo (serie) de Taylor.

$$\Delta M_x = \Delta V_x \cdot \rho_{\text{agua}} = \frac{1}{1!} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} dx dy dz \rho_{\text{agua}} dt$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO (MEDIO ISOTRÓPICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO)

$$\Delta M_x = \Delta V_x \cdot \rho_{\text{agua}} = \frac{1}{1!} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} dx dy dz \rho_{\text{agua}} dt$$

- De la ecuación anterior, eliminamos las densidades y suponemos un volumen unitario para un tiempo unitario, donde $dx = dy = dz = dt = 1$, por tanto:

$$\Delta V_x = \frac{\partial V_x}{\partial x}, \text{ y como } V_x = k \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right), \text{ sustituimos para obtener:}$$

$$\Delta V_x = \frac{\partial \left(k \frac{\partial h}{\partial x} \right)}{\partial x} = k \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO (MEDIO ISOTRÓPICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO)

- Por lo tanto en cada dirección del volumen de control tendremos que:

$$\Delta V_x = k \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad \Delta V_y = k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad \Delta V_z = k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}$$

- Sumando los tres términos obtenemos que:

$$k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \Delta \text{Volumen}$$

- La ecuación anterior representa un balance de flujos máscicos de agua en todo el volumen de control, donde $\Delta \text{Volumen}$ = Variación en el almacenamiento, es decir:

$$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO (MEDIO ISOTRÓPICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO)

- Entonces:

$$k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación General de Flujo para medio isotrópico en régimen transitorio

- Si el medio fuera anisotrópico ($K_x \neq K_y \neq K_z$) entonces:

$$\left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación General de Flujo para medio anisotrópico en régimen transitorio

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO (MEDIO ISOTRÓPICO EN RÉGIMEN TRANSITORIO)

- En régimen permanente (h no varía en el tiempo)

$$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

- Entonces:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = 0$$

**Ecuación General de
Flujo para medio
isótropo en régimen
estacionario
(ECUACIÓN DE
LAPLACE)**

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

5. Hidráulica de pozos

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I. TEMA 4. CONCEPTOS HIDROGEOLOGICOS

HIDRÁULICA DE POZOS

- Estudia las perturbaciones del agua subterránea, cuando es sometida a bombeos o inyecciones a través de pozos.
- La Hidráulica de Pozos se aplica para:
 - **Determinar y predecir el abatimiento, depresión o descenso de la superficie potenciométrica (en el pozo de bombeo y piezómetros de observación), conocidos los parámetros hidráulicos (T y S).**
 - **Estimar los parámetros hidráulicos, a través de la medición directa del descenso del nivel piezométrico (denotado con la letra "s"), por medio de pruebas en acuíferos. En este sentido, se estiman los parámetros a través de la interpretación de:**
 - **Pruebas de bombeo a caudal constante y variable**
 - **Ensayos slug**
 - **Ensayos de trazadores**

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

HIDRÁULICA DE POZOS

- La determinación de los parámetros hidráulicos, es la base para prácticamente cualquier proyecto relacionado con aguas subterráneas:
 - **Diseño de pozos de extracción para consumo humano**
 - **Delimitación de zonas de protección de acuíferos**
 - **Caracterización espacial de la vulnerabilidad de acuíferos**
 - **Determinación de zonas de captura**
 - **Diseño de sistemas de remediación de acuíferos contaminados (Pump & Treat, AirSparging, pantallas reactivas permeables, etc.).**

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

HIDRÁULICA DE POZOS

- El planteamiento matemático (soluciones analíticas de ecuación de flujo) supone que:
 - El acuífero tiene en su base una capa confinante (basamento)
 - Las formaciones geológicas son horizontales y de extensión infinita
 - La superficie potenciométrica del acuífero es horizontal antes del bombeo
 - Los cambios de la superficie potenciométrica son debidos exclusivamente al bombeo
 - El acuífero es homogéneo e isotrópico
 - El flujo alrededor del pozo es RADIAL
 - No hay flujos verticales y el agua se mueve con una componente horizontal
 - La Ley de Darcy es válida
 - El pozo de bombeo es totalmente penetrante, esto es, está ranurado en todo el espesor saturado
 - El pozo de bombeo tiene un diámetro infinitesimal y es 100% eficiente

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

ABATIMIENTO CAUSADO POR BOMBEO

- El primer análisis matemático de los efectos del descenso de niveles piezométricos producidos por bombeo en un acuífero confinado, fue publicado por C.V. Theis (1935), un hidrogeólogo de enorme prestigio, cuyas contribuciones cambiaron el rumbo de la Hidrogeología moderna.
- Su artículo se publicó en la sección de Hidrología del American Geophysical Union
- De hecho, la solución analítica de la ecuación de flujo, denominada ECUACIÓN DE THEIS O DE NO EQUILIBRIO, la realizó el Dr. Clearence I. Lubin (Universidad de Cincinnati), sin embargo NO quiso aparecer en el artículo original de Theis, pues consideró que su contribución matemática era trivial y no tenía mayores complicaciones

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (Fetter, 2003; Martínez-Alfaro, 2005)

ABATIMIENTO CAUSADO POR BOMBEO

347 Federal Bldg.
Amarillo, Texas.
December 18, 1954.

Dr. C. I. Lubin
College of Engineering
University of Cincinnati
Cincinnati, Ohio.

Dear Clarence:

I am coming through Cincinnati on January 5 or 6 and would like very much to see you. I want to impose on you to some extent but even if I did not want some help I would still like to see you. You have a nasty habit of being in Canada or some other place whenever I pass through the town but I am hoping that I can catch you this time.

I have been out here in this vicinity for the last 18 months and expect to return to Washington at the first of the year. I am still trying to figure our reserves of under-ground water for pumping irrigation districts and think I need some mathematical assistance on the job. I can't get much cooperation from my chief because, I believe, that as a geologist he rather believes that the use of mathematics to a geologist ceases with arithmetic. I'm stuck in partial derivatives and so far haven't been able to root up enough talent in these great open spaces to get me out.

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: AIH

ABATIMIENTO CAUSADO POR BOMBEO

The flow of ground water has many analogies to the flow of heat by conduction. We have exact analogies in ground water theory for thermal gradient, thermal conductivity, and specific heat. I think a close approach to the solution of some of our problems are probably already worked out in the theory of heat conduction. In this problem ~~the~~ in radial flow worked out? Given a plate of given constant thickness and with constant thermal characteristics at a uniform initial temperature to compute the temperatures throughout the plate at any time after the introduction of a sink kept at 0 temperature? And a more valuable one from our standpoint: Given the same plate under the same conditions to compute the temperatures after the introduction of a sink into which heat flows at a uniform rate? I forgot to say that the plate may be considered to have infinite areal extent.

I'm going to ask you these two questions if I get to see you but I won't expect answers unless they can be taken out of your sleeve. I've imposed enough on you in the past. I think however that the solution of these problems is of very great significance to some of the work we are called upon to do at present, such as talking the relief agencies the prospects for rehabilitation of a number of families in areas where pump irrigation is superficially feasible.

With best regards to you and your family and best wishes for pleasant holidays,

Sincerely,

Chas. V. Thois

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: AIH

ABATIMIENTO CAUSADO POR BOMBEO

en un punto cualquiera de la línea \$x = x_0\$

$$v(x, t) = \frac{1}{\pi \sqrt{kt}} \int_{-\infty}^{\infty} (a + b) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + y^2}{4kt}} \frac{dy}{2\pi}$$

$$= \frac{1}{\pi \sqrt{kt}} \int_{-\infty}^{\infty} (a + b) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + y^2}{4kt}} \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{4kt}} \frac{dy}{2\pi} \right)$$

$$= \frac{1}{\pi \sqrt{kt}} \int_{-\infty}^{\infty} (a + b) e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} \frac{dy}{2\pi}$$

$$\therefore v(x, t) = \frac{1}{\pi \sqrt{kt}} \int_{-\infty}^{\infty} (a + b) e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} \frac{dy}{2\pi}$$

$$= \beta + \frac{\alpha}{\sqrt{4\pi kt}} \int_{-\infty}^{\infty} x' e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} dx'$$

$$\beta = \frac{\alpha}{\sqrt{4\pi kt}} \int_{-\infty}^{\infty} (x_0 + x') e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} dx' + \beta$$

$$= \beta + \frac{\alpha}{\sqrt{4\pi kt}} \int_{-\infty}^{\infty} x' e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} dx'$$

$$+ \alpha \frac{\sqrt{4\pi kt}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x' e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} dx'$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: AIH

ABATIMIENTO CAUSADO POR BOMBEO

en un punto cualquiera de la línea \$x = x_0\$

$$v(x, t) = \frac{1}{\pi \sqrt{kt}} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\xi) e^{-\frac{(x-x_0)^2 + \xi^2}{4kt}} d\xi$$

Suponemos \$\phi(\xi)\$ constante, \$\lambda\$

$$v(x, t) = \frac{1}{\pi \sqrt{kt}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(x-x_0)^2 + \xi^2}{4kt}}}{\sqrt{4\pi kt}} d\xi$$

por resolución de la integral

$$v(x, t) = \frac{1}{\pi \sqrt{kt}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}}}{\sqrt{4\pi kt}} \frac{d\xi}{\sqrt{4\pi kt}} = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{kt}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}}}{\sqrt{4\pi kt}} d\xi$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} \cdot \frac{1}{\sqrt{4\pi kt}} d\xi = \frac{1}{\sqrt{4\pi kt}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} d\xi$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} d\xi = \frac{1}{\sqrt{4\pi kt}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} d\xi = \frac{1}{\sqrt{4\pi kt}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4kt}} d\xi$$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: AIH

ABATIMIENTO CAUSADO POR BOMBEO

Let $Q = f(t) dt'$

In such a case $w(x, y, z) = \int_0^t \frac{f(t')}{2\sqrt{\pi k t'}} e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4kt'}} dt'$

Let $f(t) = \text{constant } \lambda$ (for unconfined, for whole line)

$w(x, y, z) = \frac{\lambda}{2\sqrt{\pi k}} \int_0^t \frac{e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4kt'}}}{\sqrt{t-t'}} dt'$

Let $\tau = \frac{x^2+y^2+z^2}{4k(t-t')}$ $t-t' = \frac{x^2+y^2+z^2}{4k\tau}$
 $-dt' = -\frac{x^2+y^2+z^2}{4k\tau^2} d\tau$

$w(x, y, z) = \frac{\lambda}{2\sqrt{\pi k}} \int_{\frac{x^2+y^2+z^2}{4kt}}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\frac{x^2+y^2+z^2}{4k\tau}} \frac{x^2+y^2+z^2}{4k\tau^2} d\tau$

$= \frac{\lambda x}{\sqrt{\pi} 2k} \int_{\frac{x^2+y^2+z^2}{4kt}}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau^2} d\tau = \frac{\lambda x}{\sqrt{\pi} 2k} \left\{ e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4kt}} \frac{1}{\frac{x^2+y^2+z^2}{4kt}} + 2 \int_{\frac{x^2+y^2+z^2}{4kt}}^{\infty} e^{-\tau} d\tau \right\}$

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU. FUENTE: AIH

ABATIMIENTO CAUSADO POR BOMBEO

Dear Clarence:

April 23, 1935

I am enclosing a copy of a paper utilizing your work to be given before the Section of Hydrology of the American Geophysical Union on April 25 or 26. I regret I did not get a copy to you sooner, but it has just been finished.

There will be no time for a reply before the paper is given orally but there will be time to incorporate any criticism before it is published in the Transactions. I have been somewhat at a loss as how to handle your part in it. I should be glad to include you as one of the authors, for it could not have been written without you, but did not want to put any responsibility on you until you had a chance to criticize the mathematical form. If you wish to have your name as an author, be sure that I shall be glad to add it.

I believe that this paper is a fundamental contribution to ground water hydrology. I, personally, feel sure that your work during our visit has given me the basic theory for all my work in New Mexico and Texas. I hope we have a chance to continue the development of the theory.

I want to thank you again for the great help you gave me. Best regards to you, your family, and our common friends at Cincinnati.

Sincerely,

Chas. V. Theis
 Assistant Geologist

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU. FUENTE: AIH

ABATIMIENTO CAUSADO POR BOMBEO

Dear Clarence:

April 23, 1935

I am enclosing a copy of a paper utilizing your work to be given before the Section of Hydrology of the American Geophysical Union on April 25 or 26. I regret I did not get a copy to you sooner, but it has just been finished.

There will be no time for a reply before the paper is given orally but there will be time to incorporate any criticism before it is published in the Transactions. I have been somewhat at a loss as how to handle your part in it. I should be glad to include you as one of the authors, for it could not have been written without you, but did not want to put any responsibility on you until you had a chance to criticize the mathematical form. If you wish to have your name as an author, be sure that I shall be glad to add it.

I believe that this paper is a fundamental contribution to ground water hydrology. I, personally, feel sure that your work during our visit has given me the basic theory for all my work in New Mexico and Texas. I hope we have a chance to continue the development of the theory.

I want to thank you again for the great help you gave me. Best regards to you, your family, and our common friends at Cincinnati.

Sincerely,

Chas. V. Theis
Assistant Geologist

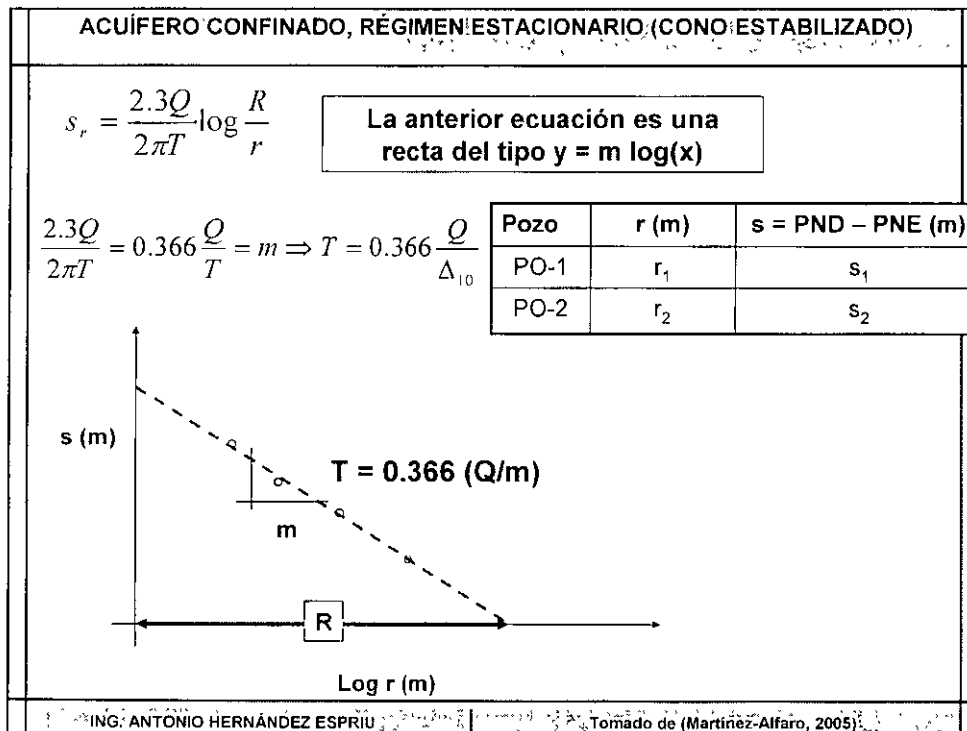
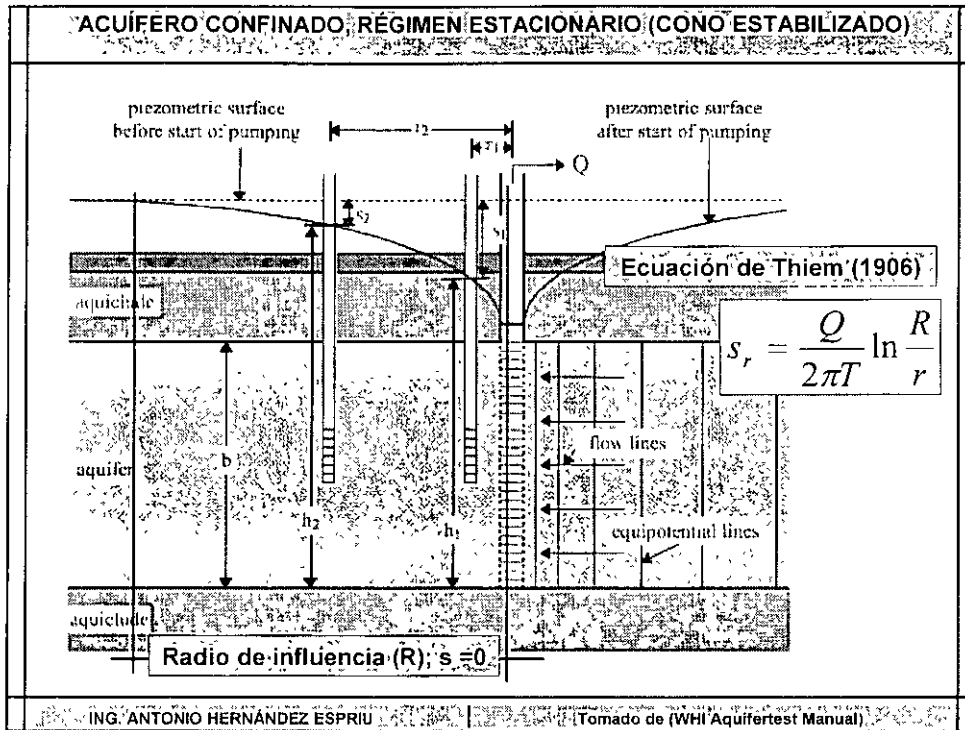
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: AIH

HIDRÁULICA DE POZOS

- Las soluciones analíticas de la ecuación de flujo para predecir el abatimiento o estimar los parámetros hidráulicos son:

Régimen/ Acuífero	Libre	Semiconfinado	Confinado
Estacionario	Ecuación de Dupuit (1863)	Ecuación de De Glee (1930)	Ecuación de Thiem (1906)
Transitorio	Ecuación de Neuman (1975)	Ecuación de Hantush (1964)	Theis (1935) Simplificación de Jacob-Cooper (1946)

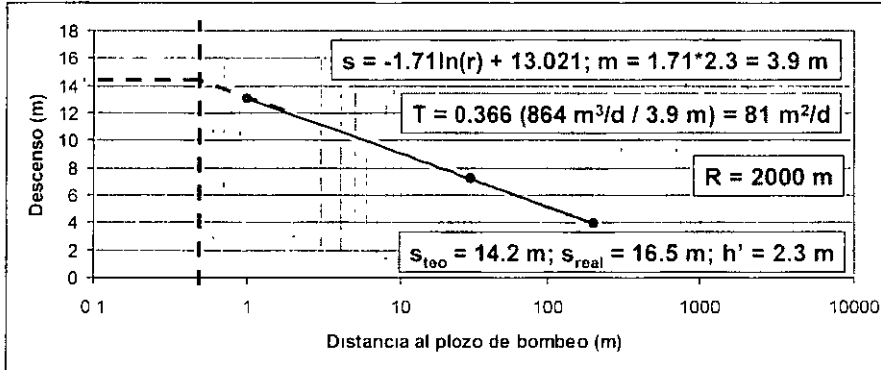
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU Tomado de (Martínez-Alfaro, 2005)



ACUÍFERO CONFINADO, RÉGIMEN ESTACIONARIO (CONO ESTABILIZADO)

- Prueba de bombeo en acuífero confinado.
- Arenisca de grano medio
- $Q_{\text{BOMBEO}} = 10 \text{ L/seg.}$
- $\text{Diam}_{\text{POZO}} = 0.5 \text{ m.}$
- 3 pozos de observación.
- Cono estabilizado después de 7 horas.
- Descenso en el pozo = 16.5 m

Pozo	r (m)	s (m)
PO-1	1	13
PO-2	30	7.25
PO-3	200	3.9



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (Martínez-Alfaro, 2005)

SOLUCIONES ANALÍTICAS DE LA ECUACIÓN DE FLUJO

Régimen / Acuífero	Libre	Semiconfinado	Confinado
Estacionario	<p>Ecuación de Dupuit (1863)</p> $H_0^2 - H^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln\left(\frac{R}{r}\right)$	<p>Ecuación de De Glee (1930)</p> $s_r = \frac{Q}{2\pi T} k_0 \left(\frac{r}{B}\right); B = \sqrt{\frac{T}{k/b}}$	<p>Ecuación de Thiem (1906)</p> $s_r = \frac{2.3Q}{2\pi T} \log \frac{R}{r}$
Transitorio	<p>Ecuación de Neuman (1975)</p> $s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, u_A, \Gamma)$ $u_A = \frac{r^2 \phi_{ef}}{4Tt}$ $\Gamma = \frac{r^2 k_v}{b^2 k_h}$	<p>Ecuación de Hantush (1964)</p> $s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \frac{r}{B})$	<p>Theis (1935)</p> $s = \frac{Q}{4\pi T} W(u);$ $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

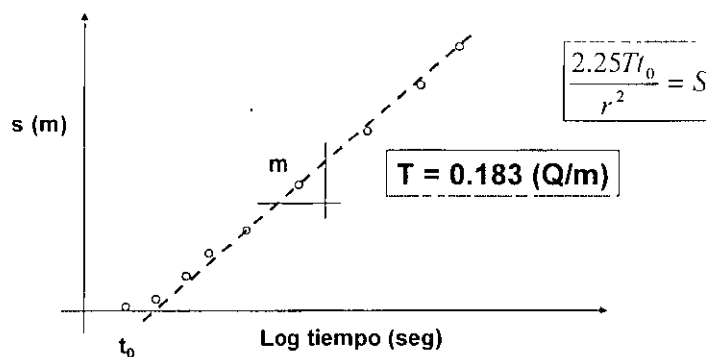
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (Martínez-Alfaro, 2005)

ACUIFERO CONFINADO RÉGIMEN TRANSITORIO (JACOB-COOPER)

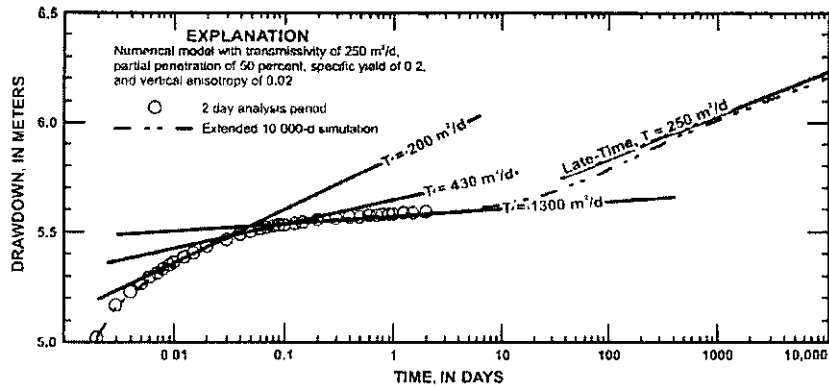
- El método de **Jacob-Cooper** (1946) es una simplificación de la ecuación de Theis para caracterizar los parámetros hidráulicos de acuíferos confinados.
- Aunque el método de Jacob-Cooper puede aplicarse para valores de $u < 0.01$, publicaciones recientes, ratifican que el método **sigue siendo el más razonable y práctico para interpretar pruebas de bombeo, aun para acuíferos no confinados** (Halford, J., et al., 2006).
- El método puede aplicarse para interpretar una prueba de bombeo en su etapa de abatimiento y en su etapa de recuperación. En la etapa de abatimiento se puede interpretar T y S (siempre y cuando se tengan pozos de observación) mientras que en la de recuperación solo puede obtenerse T, pero con una mucho mayor precisión que en la etapa de bombeo.

ACUIFERO CONFINADO RÉGIMEN TRANSITORIO (JACOB-COOPER)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2.25Tt}{r^2}\right) = 0.183 \frac{Q}{T} \log\left(\frac{2.25Tt}{r^2}\right)$$



AJUSTE E INTERPRETACIÓN DE LA RECTA DE JACOB-COOPER



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (Halford, K., et al., 2006)

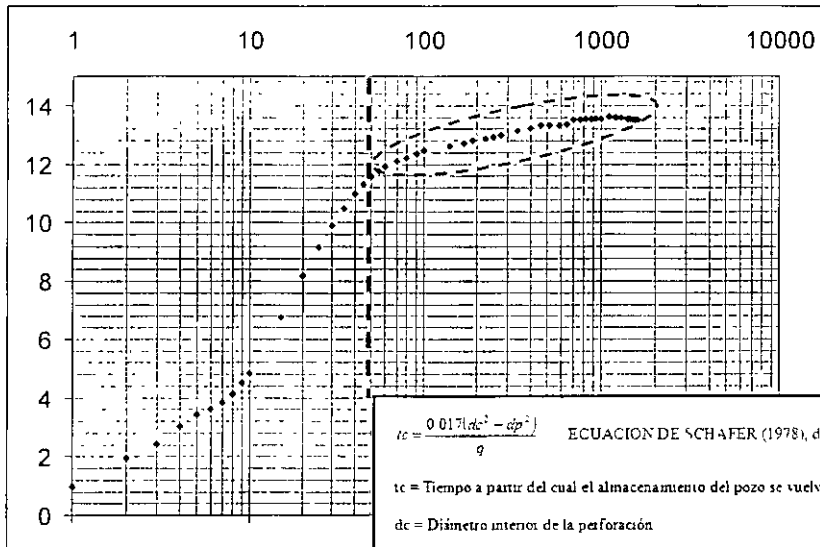
ACUÍFERO CONFINADO; RÉGIMEN TRANSITORIO (JACOB-COOPER)

- Variables que pueden complicar la interpretación de una prueba de bombeo
 - Capacidad del pozo
 - Límites de acuíferos (barreras impermeables y de recarga)
 - Efectos de goteos y drenajes diferidos en acuíferos libres y semiconfinados
 - Problemática convencional (geología, hidrología superficial, equipo de aforo, método de medición, etc.).

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I. TEMA 4. CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

CAPACIDAD O ALMACENAMIENTO DEL POZO



$$t_c = \frac{0.0177(d_c^2 - d_p^2)}{q} \quad \text{ECUACION DE SCHAFER (1978), donde}$$

t_c = Tiempo a partir del cual el almacenamiento del pozo se vuelve nulo

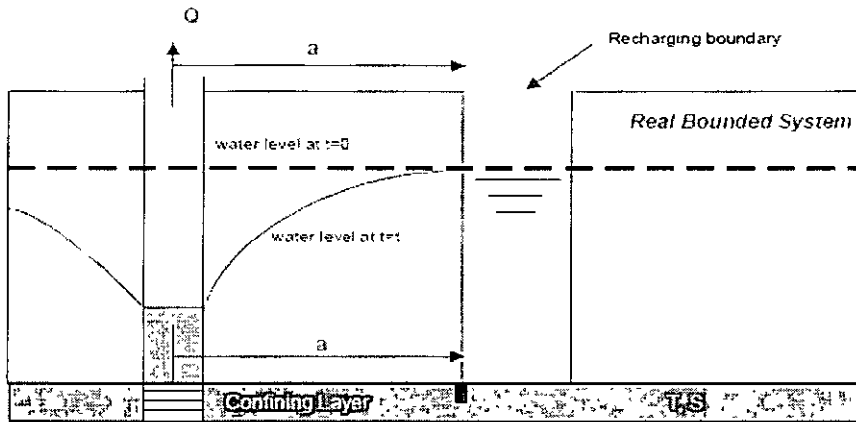
d_c = Diámetro interior de la perforación

d_p = Diámetro de la columna de succión

q = Caudal específico del pozo (Lps.m)

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

LÍMITES DE RECARGA (ríos o arroyos)



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (Martínez-Alfaro, 2005)

LÍMITES DE RECARGA (ríos o arroyos)

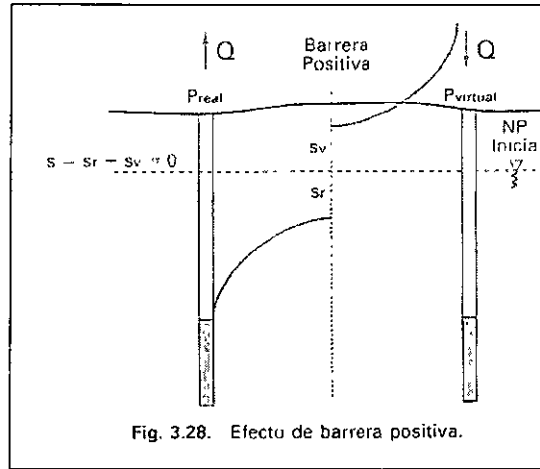


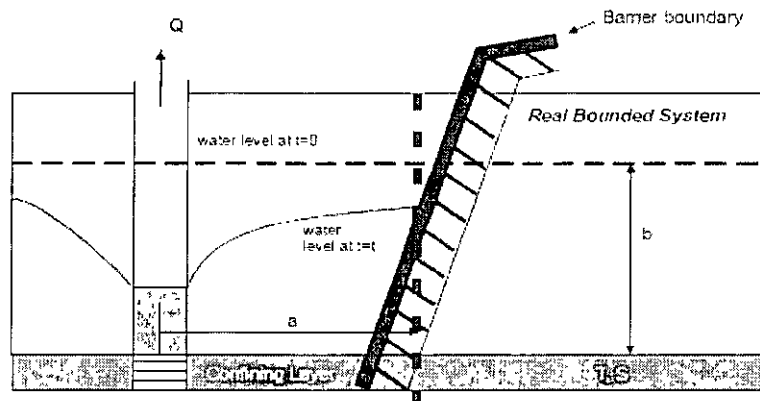
Fig. 3.28. Efecto de barrera positiva.

- En un gráfico Log tiempo vs descenso, la recta disminuye de pendiente (debido a que los descensos disminuyen) del orden de la mitad con respecto al segmento anterior

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (Martínez-Alfaro, 2005)

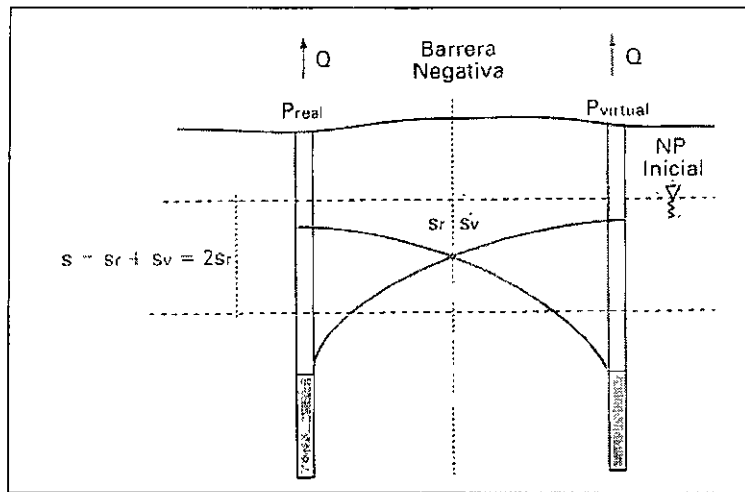
LÍMITE IMPERMEABLE (fallas y contactos con acuicludos)



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

Tomado de (Martínez-Alfaro, 2005)

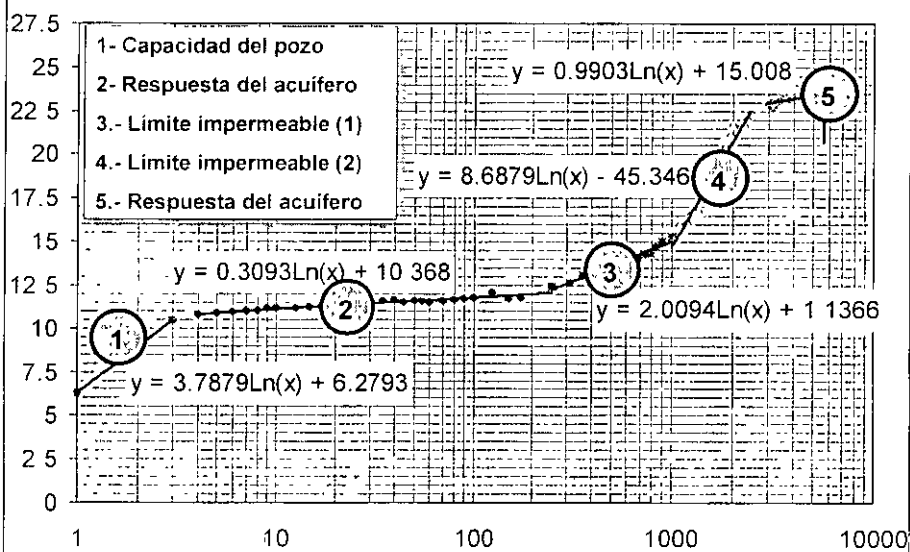
LÍMITE IMPERMEABLE (fallas y contactos con acuícludos)



- En un gráfico Log tiempo vs descenso, la recta aumenta de pendiente (debido a que los descensos aumentan) del orden del doble con respecto al segmento anterior

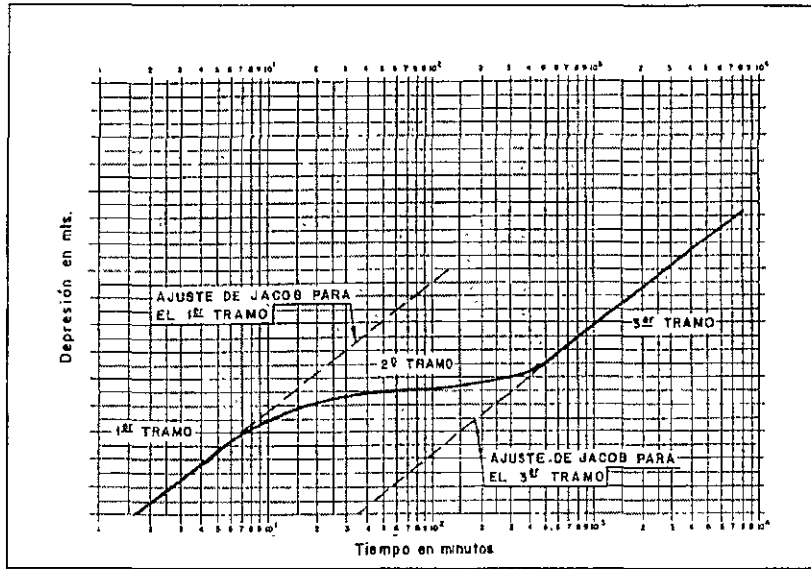
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | Tomado de (Martínez-Alfaro, 2005)

COMBINACIÓN DE LÍMITES EN UNA PRUEBA DE BOMBEO



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU | MÓDULO I. TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

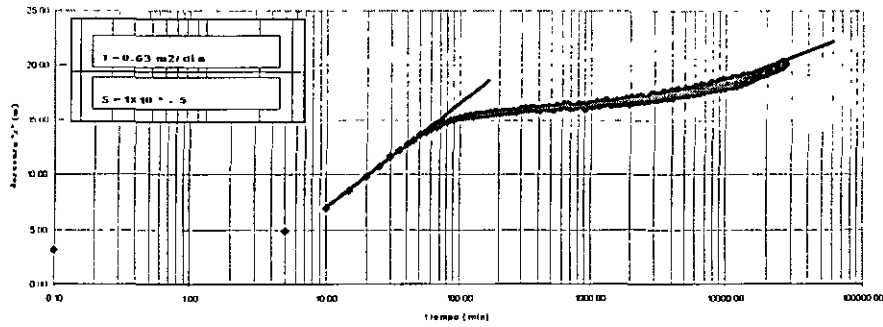
DRENAJE DIFERIDO



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU MÓDULO I: TEMA 4: CONCEPTOS HIDROGÉOLÓGICOS.

DRENAJE DIFERIDO

ENSAYO DE BOMBEO S-33



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: CIHS-38.

PRUEBAS SLUG (POZO ÚNICO): DEFINICIONES Y VENTAJAS

- En un ensayo que se realiza en un solo pozo y consiste básicamente en la extracción o inyección instantánea de un volumen de agua en un pozo de monitoreo y la posterior medición de la recuperación del nivel piezométrico con respecto al tiempo.
- Es una prueba de logística sencilla y fácil ejecución en campo.
- Por ende es una prueba de bajo costo con respecto a otras alternativas y la duración de la prueba (dependiendo por supuesto de la geología local) es relativamente rápida.
- Muy útil para formaciones de baja permeabilidad o para acuíferos contaminados, donde el bombeo de agua subterránea resulta un verdadero problema.
- Permite obtener información sobre la variación espacial de las propiedades hidráulicas del acuífero, al contrario de pruebas de bombeo que proveen información hidráulica de grandes volúmenes y áreas.

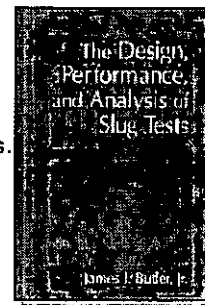
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (BUTLER, 1998)

PRUEBAS SLUG (POZO ÚNICO): DEFINICIONES Y VENTAJAS

• Sin embargo, hay escepticismo sobre esta técnica por la diferencia de los parámetros hidráulicos que se obtienen cuando estos se comparan con los arrojados por otras técnicas Butler (Kansas Geological Survey), piensa que esto se debe a:

- La escala de observación (factor secundario),
- Los pozos de monitoreo tienen un mínimo grado de desarrollo, actividad que suele menospreciarse, y en la mayoría de las ocasiones, las interpretaciones efectuadas reflejan la permeabilidad de la piel del pozo y no de la formación geológica.
- La sencillez del método se piensa que puede añadir "cierto azar" a los resultados.
- Se utilizan los métodos de interpretación convencional en casos particulares que requieren otro tipo de análisis.

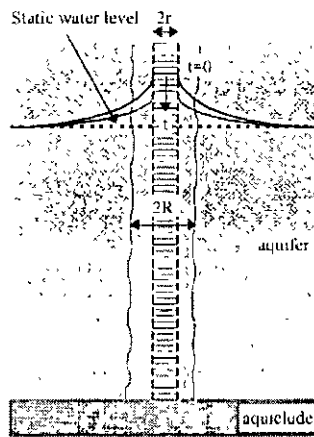


ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

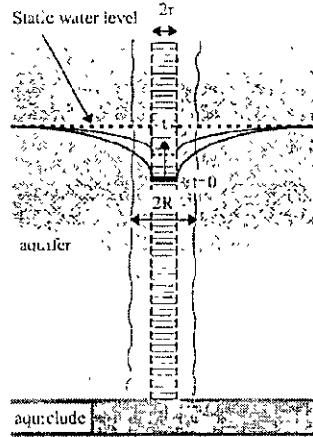
FUENTE: (BUTLER, 1998)

PRUEBAS SLUG (POZO UNICO): PRINCIPIO

Slug Test

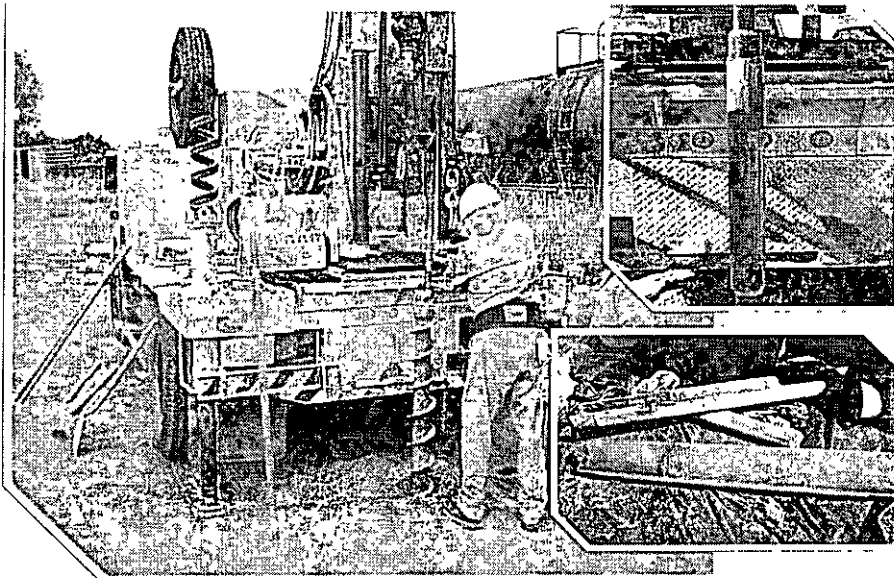


Bail Test



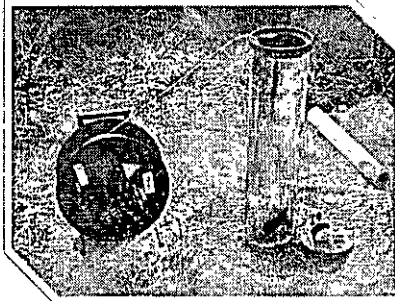
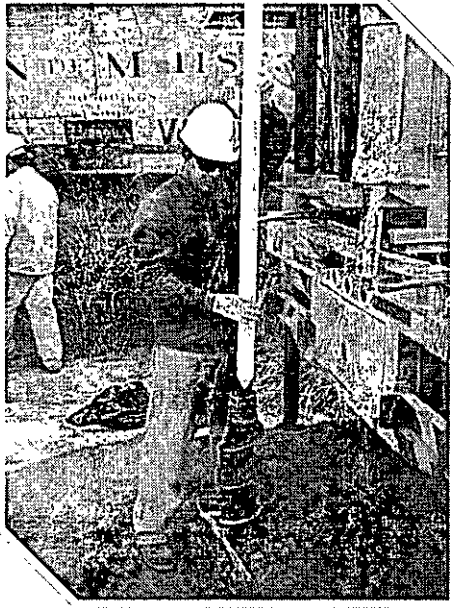
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU FUENTE: AQUIFERTEST MANUAL

EJECUCIÓN EN CAMPO: (1) PERFORACIÓN DE SONDEO



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU Fotografía de: Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V.

EJECUCIÓN EN CAMPO: (2) INSTALACIÓN DE POZO DE MONITOREO



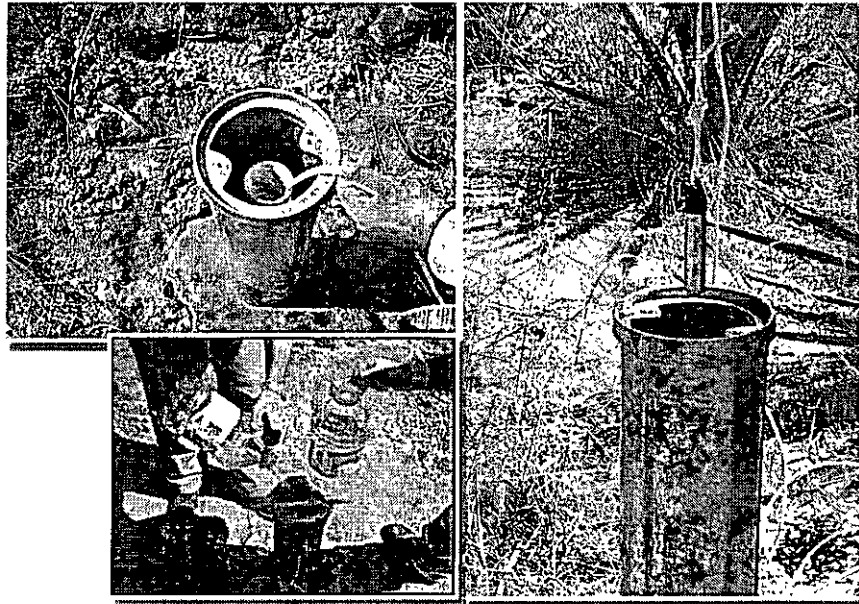
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU Fotografía de: Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V.

EJECUCIÓN EN CAMPO: (3) LIMPIEZA Y DESARROLLO DEL POZO



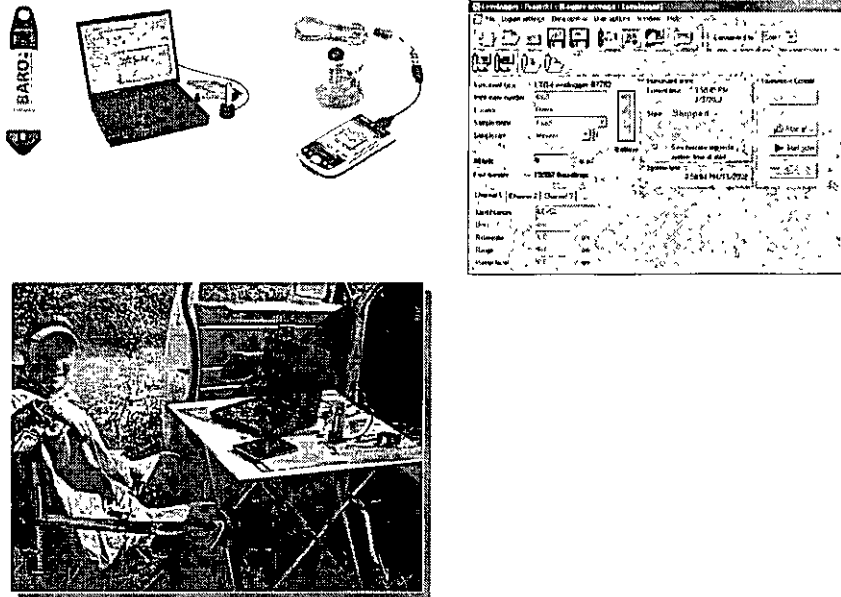
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU Fotografía de: Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V.

EJECUCIÓN EN CAMPO: (4) EJECUCIÓN DE LA PRUEBA



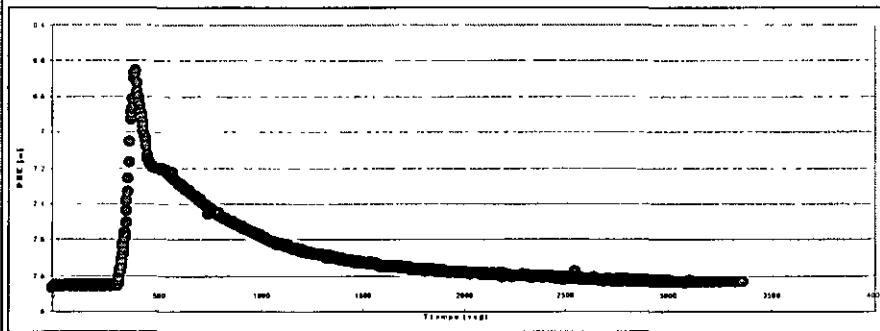
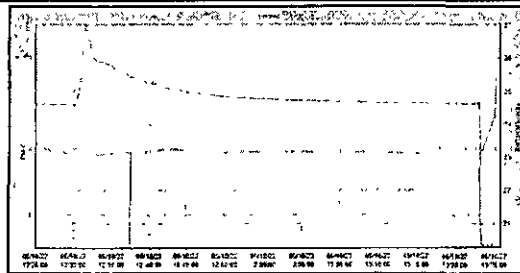
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU Fotografía de: Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V.

EJECUCIÓN EN CAMPO: (4) EJECUCIÓN DE LA PRUEBA



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU Fotografía de: Corporación Ambiental de México, S.A. de C.V.

EJECUCIÓN EN CAMPO (4) EJECUCIÓN DE LA PRUEBA



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

MÓDULO I. TEMA 4. CONCEPTOS HIDROGEOLÓGICOS

PRUEBAS SLUG: METODOS DE INTERPRETACION

• Métodos convencionales:

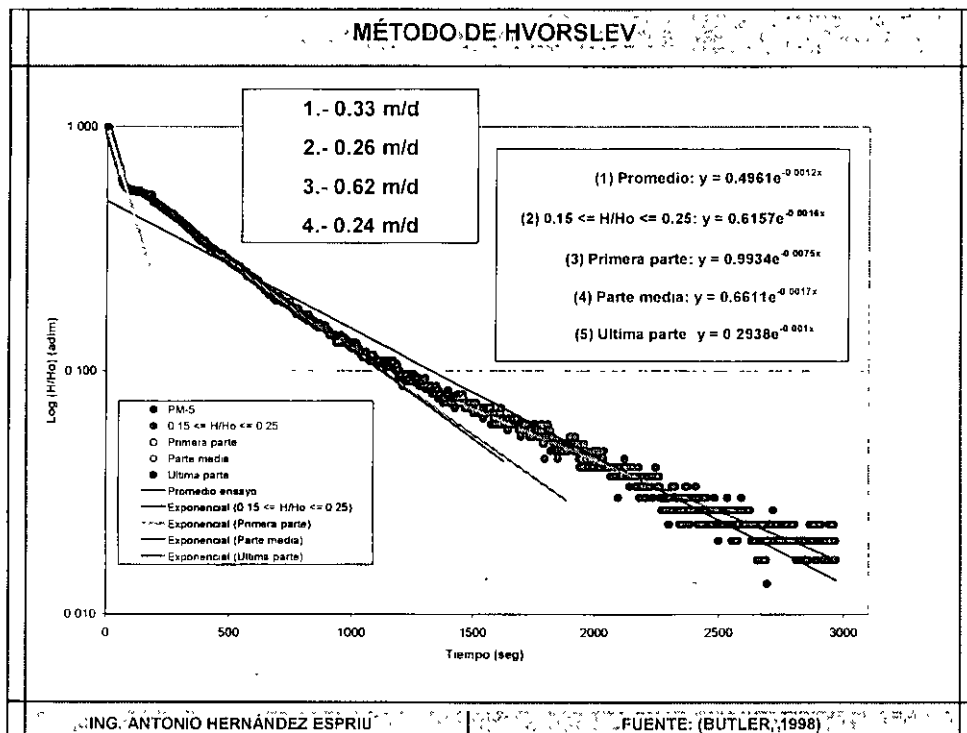
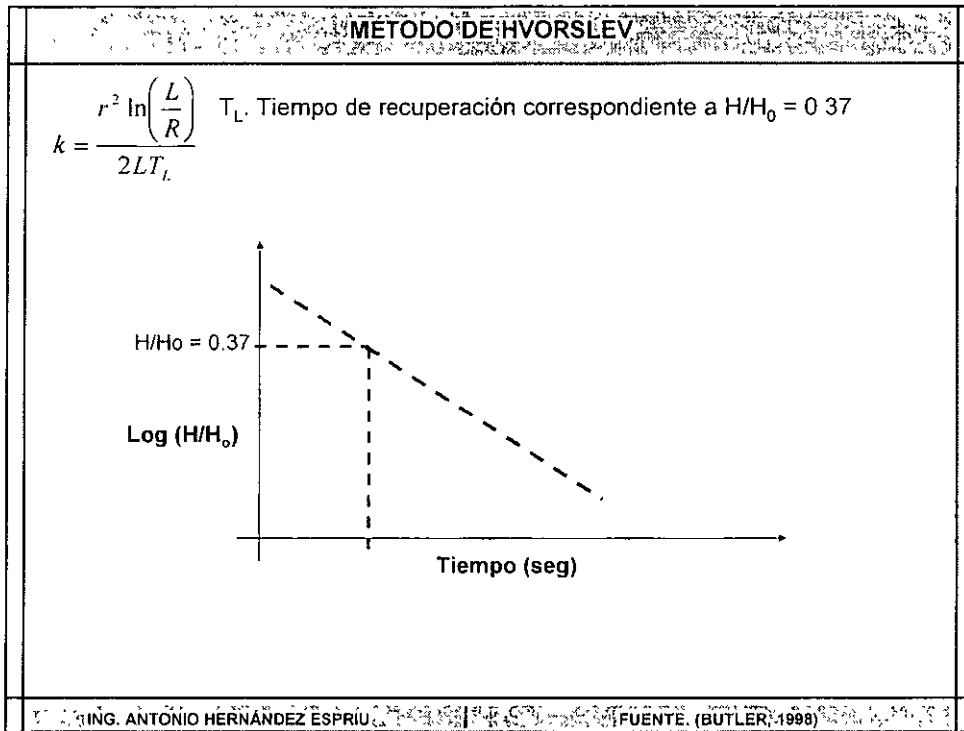
- Hvorslev (1951), para acuíferos confinados.
- Bouwer-Rice (1976 y 1989) para acuíferos libres o confinados.
- Cooper-Papadopoulos, para acuíferos confinados y de baja k.

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (BUTLER, 1998)

PRUEBAS SLUG: MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN	
<ul style="list-style-type: none"> • Correcciones de los métodos convencionales (Butler, 1998): <ul style="list-style-type: none"> • Formaciones confinadas, en pozos totalmente penetrantes: Hvorslev; Cooper-Papadopulos; método de la deconvolución. • Formaciones confinadas, en pozos parcialmente penetrantes: Hvorslev; Cooper-Papadopulos; Dagan, KGS. • Formaciones no confinadas, ranurado por debajo del nivel freático: Bouwer-Rice; Dagan; KGS. • Formaciones no confinadas, ranurado en medio del nivel freático: Bouwer-Rice; Dagan. • Formaciones de baja permeabilidad: Shut-it slug test; drillstem test; packer test. • Formaciones de alta permeabilidad: Modelo de Van Der Kamp; métodos lineales; métodos no lineales 	
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU	FUENTE: (BUTLER, 1998)

PRUEBAS SLUG: MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN	
<ul style="list-style-type: none"> • Correcciones de los métodos convencionales (Butler, 1998): <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de la piel del pozo: Ramey; Peres et al., KGS. • En multipiezómetros: Cooper-Papadopulos; Chu & Grader. • En formaciones fracturadas y de doble porosidad: Modelos de fractura discreta; modelos de doble porosidad. 	
ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU	FUENTE: (BUTLER, 1998)

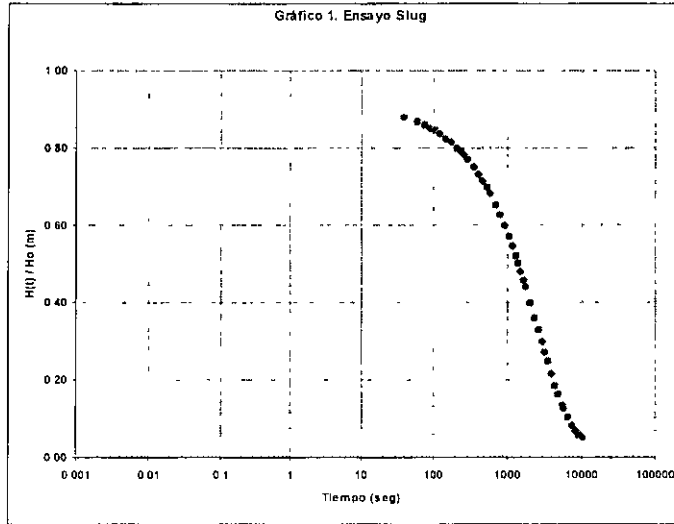


MÉTODO DE COOPER-PAPADOPOLUS

- Se basa en la obtención de dos parámetros adimensionales (α y β) por medio de curvas tipo, de modo que se puede determinar k , T y S :

$$\alpha = \frac{\pi r^2 S}{VC\rho g}$$

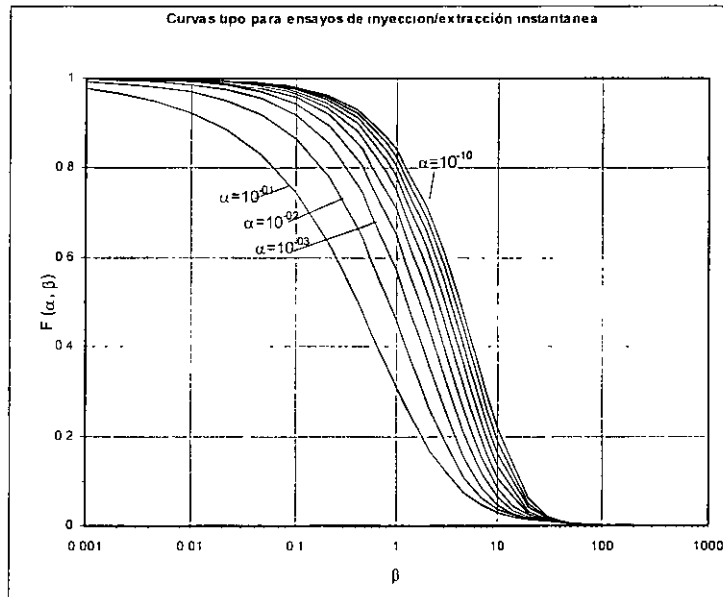
$$\beta = \frac{\pi T t}{VC\rho g}$$



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (CIHS-38)

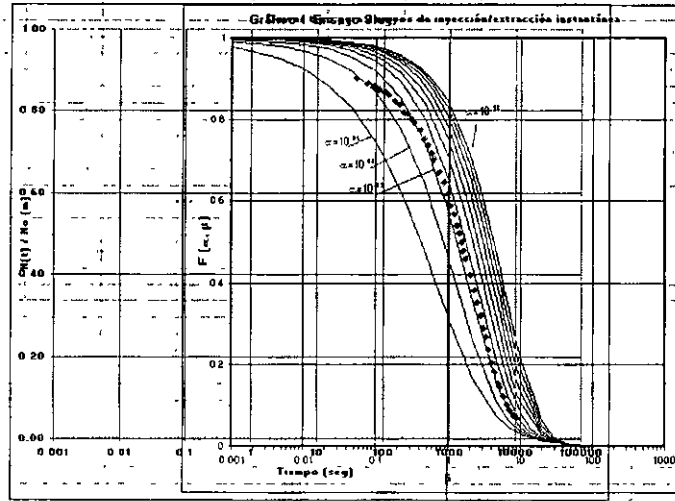
MÉTODO DE COOPER-PAPADOPOLUS



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (CIHS-38)

METODO DE COOPER-PAPADOPOULOS



ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (CIHS-38)

¡MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

ING. ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIU

FUENTE: (CIHS-38)