


CI51J  
Aguas Subterráneas. Semestre Otoño 2004

**Clase Auxiliar N° 3:  
"Análisis de Pruebas de Bombeo"**



Profesor : Carlos Espinoza  
Auxiliar : Walter Wilmans  
Ayudante : Rodrigo Muñoz

**PARTE A  
ANTECEDENTES GENERALES**

8 de Junio de 2004  
Santiago, Chile

**Procedimientos de Construcción Pozo**

- Ubicación Punto a perforar: geología, geofísica. ("Radiestecistas")
- Construcción Pozo:
  - Percusión.
  - Rotación (circulación directa e inversa).
  - Rotación con circulación de aire.
  - Roto Percusión.
- Habilitación (tubos, cribas, sello sanitario, desarrollo).
- Prueba de bombeo (gasto constante y variable). Medición de niveles y caudales salientes del pozo
- Ubicación de la bomba definitiva.

**Métodos de Exploración**


Geológicos:

- Imágenes Satelitales y Fotogeología
- Geología Regional
- Geología Local
- Historia geológica
- Perforación

Menor detalle

Mucho detalle

**Mapas Geológicos**



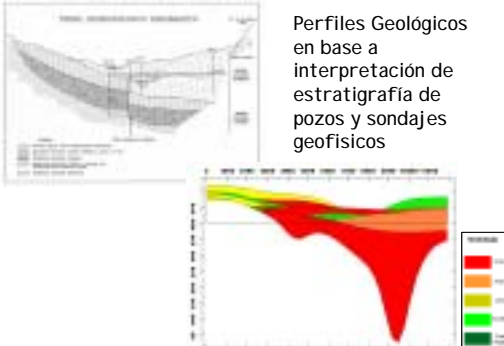
Mapa Geológico

Carta Geológica de Talca

Depósitos del abanico fluvial del río Maule  
Depósitos fluviales

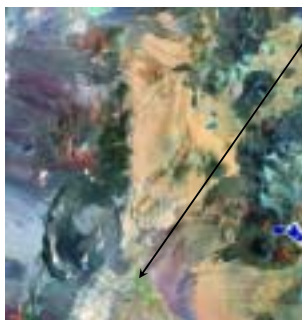
**Perfiles Geológicos**

Perfiles Geológicos en base a interpretación de estratigrafía de pozos y sondajes geofísicos





## Fotos Satelitales

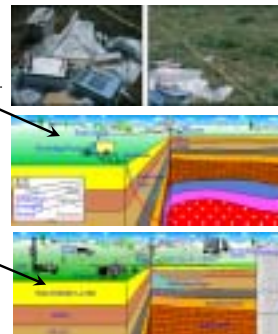


- Filtros buscando vegetación.
- Contrastar con geología de superficie.
- Exploración de Terreno buscando afloramientos y árboles.

## Métodos de Exploración

### Geofísicos:

- Resistividad eléctrica.
- Electromagnetismo.
- Gravimetría.
- Sísmica.

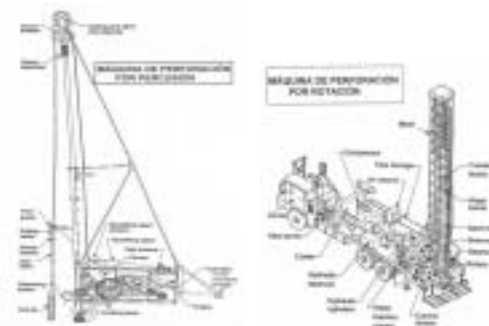


## Métodos de Perforación (comparación diferentes Métodos)

PARÁMETRO	PERFORACIÓN MANUAL	PERFORACIÓN MECÁNICA	PERFORACIÓN ROTATIVA	PERFORACIÓN ROTATIVA CON LUBRICACIÓN
VELOCIDAD DE PERFORACIÓN	Baja	Alta	Alta	Alta
PROFUNDIDAD DE PERFORACIÓN	Hasta 100 m	Hasta 1000 m	Hasta 1000 m	Hasta 1000 m
TIPO DE SUELO	Suave	Duro	Duro	Duro
TIPO DE LUBRICACIÓN	No requiere	Requiere	Requiere	Requiere
TIPO DE EQUIPO	Simple	Complejo	Complejo	Complejo
TIPO DE OPERARIO	Operario manual	Operario mecánico	Operario mecánico	Operario mecánico
TIPO DE COSTO	Bajo	Alto	Alto	Alto
TIPO DE RIESGO	Bajo	Alto	Alto	Alto
TIPO DE EFICIENCIA	Baja	Alta	Alta	Alta
TIPO DE SEGURIDAD	Baja	Alta	Alta	Alta
TIPO DE MANTENIMIENTO	Bajo	Alto	Alto	Alto
TIPO DE VIDA ÚTIL	Baja	Alta	Alta	Alta

Fuente: Curso "Exploración y Explicación de Aguas Subterráneas para Producción Minera". Gerardo Díaz. INGEDOS.

## Máquinas para Construcción de Pozos



Fuente: Curso "Exploración y Explicación de Aguas Subterráneas para Producción Minera". Gerardo Díaz. INGEDOS.

## Construcción de Pozos: Método de Percusión



## Construcción de Pozos: Método de Rotación

### TREPANOS O TRI CONOS





### Construcción de Pozos: Método de Rototopercusión

### Estratigrafía Metro a Metro

Nivel Superficie

Prof = 0 a 6 m

Prof = 122 a 128 m

Prof = 278 a 280 m

Fin Pozo: Perfora la roca

### Ubicación de la Bomba y Sello Sanitario

Bombas de Pozo Profundo

Sello Sanitario

### Medición de Niveles

### Datos a Obtener de una Pruebas de Bombeo

Datos que deberían obtenerse de una Prueba de bombeo:

- Estratigrafía del pozo: realizada por geólogo u operador máquina (muy rústico el lenguaje).
- Habilitación del pozo: Ubicación de las cribas.
- Prueba de gasto variable.
- Prueba de gasto constante.
- Prueba de recuperación.
- Datos de calidad.

### Usos de los datos Prueba de Bombeo

- Cálculo de comportamiento al largo plazo de un pozo de producción.
- Relaciones entre zonas de mayor y menor permeabilidad en un modelo de simulación de aguas subterráneas (T, S).
- Cálculo de radio de protección de un pozo. (Para obtener derechos de agua)





## PARTE B ANÁLISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO

19 de Abril al 28 de Mayo de 2004  
Santiago, Chile

### • PRUEBA GASTO VARIABLE Y CONSTANTE

#### • EJEMPLOS DE PRUEBAS DE BOMBEO

- Pozo de bombeo con Pozo de Observación (Ej 1)
- Pozo de bombeo con tres pozos de Observación (Ej 2)
- Pozo de bombeo con recuperación (Ej 3)
- Pozo de observación acuífero libre (Ej 5)



### Prueba de Gasto Variable

- Sirve para determinar el caudal máximo a extraer del pozo y ubicación de la bomba.

### Prueba de Gasto Constante

- Sirve para determinar los parámetros elásticos de un acuífero (T, S).
- En Chile las pruebas de gasto constante son realizadas por 24 horas, con tres horas de estabilización.



### • PRUEBA GASTO VARIABLE Y CONSTANTE

#### • EJEMPLOS DE PRUEBAS DE BOMBEO

- Pozo de bombeo con Pozo de Observación (Ej 1)
- Pozo de bombeo con tres pozos de Observación (Ej 2)
- Pozo de bombeo con recuperación (Ej 3)
- Pozo de observación acuífero libre (Ej 5)



### EJ 1: Características Pozo

- Pozo de producción de agua.
- Pozo perforado con equipo Drilltech de rotación, con sistema de circulación normal, y muestras de "cuttings" cada metro. Se utilizaron aditivos, principalmente polímeros, aumentador de viscosidad ("viscomud"), inhibidor de arcillas, espumante y controlador de pH.
- Profundidad perforada: 250 [m]
- Presencia de agua a los 97.7 [m]
- No se encuentra roca basal durante la perforación.

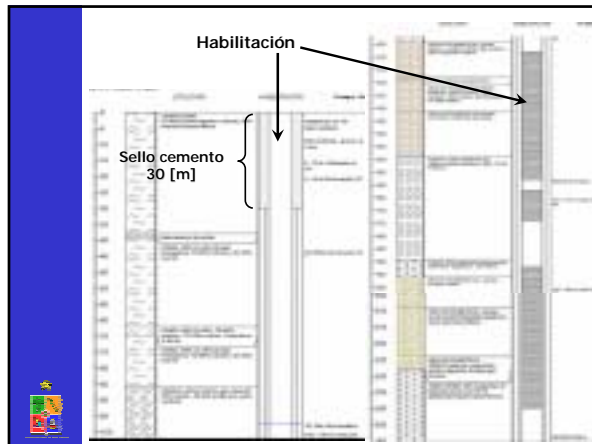


### EJ 1: Estratigrafía

"La columna de sedimentos presentes está constituida principalmente por cenizas y gravas con intercalaciones de niveles arcillosos del Cuaternario. El sondaje no alcanzó la roca basamental."







### Construcción

La perforación se realizó con un diámetro de 32" desde la superficie y hasta los 30 [m], y de 22" desde los 30 [m] hasta los 250 [m]

### Habilitación

La habilitación del pozo se efectuó en un diámetro de 16", con un total de 113 [m] de cribas de acero y 137 m de tubería ciega.

De [m]	Hasta [m]	Criba [m]	Ciego [m]	Descripción
0	107	0	107	Ciego 16"
107	158	51	0	Criba slot 40, 16"
158	161	0	3	Ciego 16"
161	174	13	0	Criba slot 40, 16"
174	191	0	17	Ciego 16"
191	240	49	0	Criba slot 40, 16"
240	250	0	10	Ciego 16"
250				Criba slot 40, 16"
Total		113	137	[m]



### Prueba de Gasto Variable

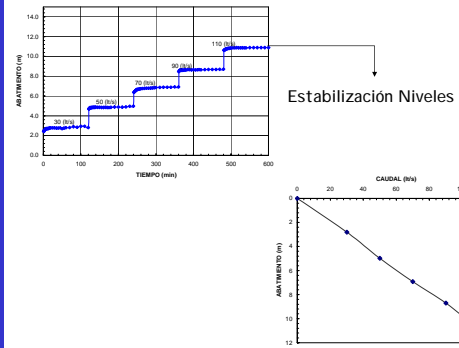
Con el objeto de identificar el potencial del acuífero, se procedió a efectuar una prueba de bombeo de caudal variable de 30, 50, 70, 90 y 110 [l/s].



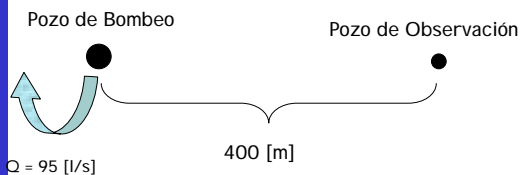
### Prueba de Gasto Constante

Una prueba de caudal constante de 95 [l/s], por 48 horas.

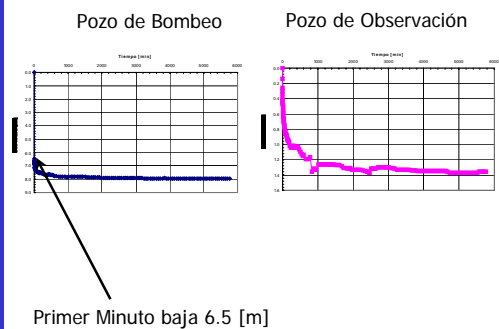
### Prueba de Gasto Variable



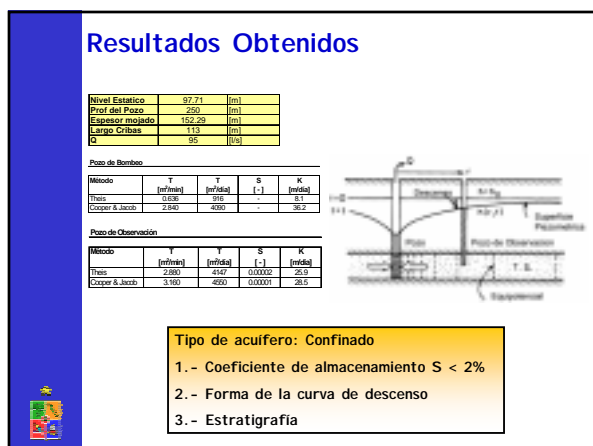
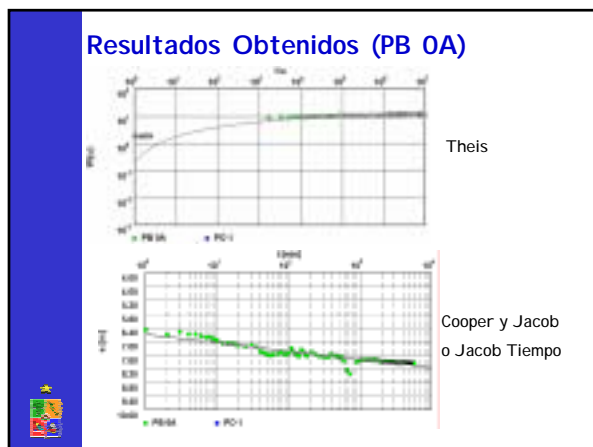
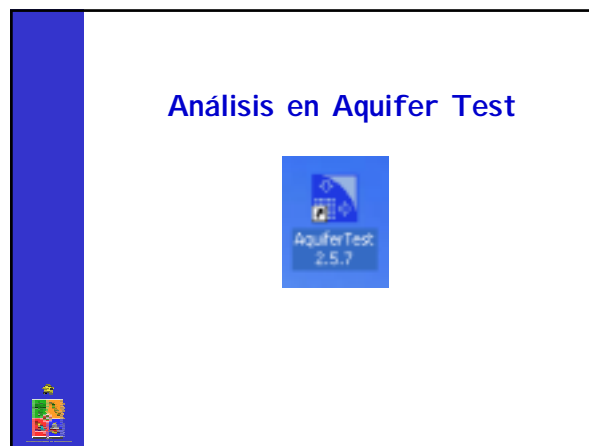
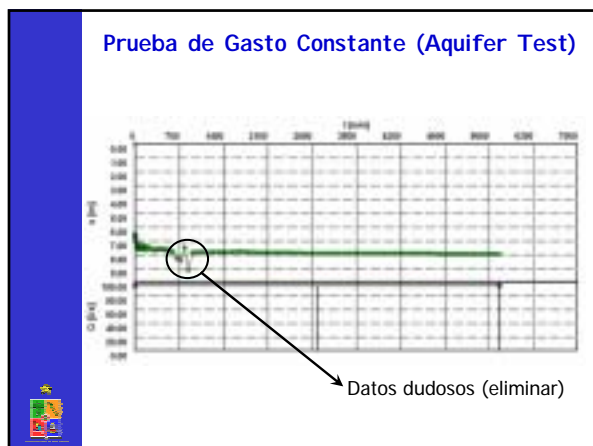
### Esquema Prueba de Bombeo (Ej 1)



### Prueba de Gasto Constante







- PRUEBA GASTO VARIABLE Y CONSTANTE
- EJEMPLOS DE PRUEBAS DE BOMBEO
  - Pozo de bombeo con Pozo de Observación (Ej 1)
  - Pozo de bombeo con tres pozos de Observación (Ej 2)
  - Pozo de bombeo con recuperación (Ej 3)
  - Pozo de observación acuífero libre (Ej 5)



## EJ 2: Descripción General

- El pozo PB 1A reconoció una secuencia de cenizas de 39 m de espesor e ignimbrita a partir de los 39 metros y hasta los 230 metros. El grado de fracturamiento de la ignimbrita permite el almacenamiento y transmisión de agua lo que le confiere las características del principal acuífero de esta zona y que se reconoció mediante los pozos de exploración.
- El nivel estático del agua se encontró a los 12,93 m, después de desarrollado el pozo, manteniéndose en general constante durante la operación.

## Estratigrafía

De [m]	Hasta [m]	DESCRIPCIÓN
0	21	CENIZA gris con abundante cuarzo transparente a lechoso, fina a media.
21	32	CENIZA gris similar a la anterior, con aumento en el porcentaje de cuarzo y fragmentos de lobas.
32	34	CENIZA gris más o menos soldada. Abundantes fragmentos de lobas.
34	39	CENIZA gris y loba parda. 50 y 50%.
39	41	LOBA parda (ignimbrita), con fragmentos de lobas amarillentas y algunos de cenizas.
41	72	IGNIMBRITA rosada oscura con ejes de cuarzo, cristales de biotita y fragmentos de cuarzo lechoso.
72	74	IGNIMBRITA rosada oscura con intercalaciones de lobas amarillentas y rosadas.
74	85	IGNIMBRITA rosada oscura con cristales de cuarzo y biotita. Escasos fragmentos menos del 1% de loba amarillenta.
85	112	IGNIMBRITA rosada oscura misma unidad, fractura y pátinas rellenas con arcillas amarillentas a verde. Algunos fragmentos leñidos de arcillas. Zona fracturada.
112	136	IGNIMBRITA rosada oscura misma unidad, pátinas de arcillas amarillentas en fracturas. Ligera disminución en el contenido de arcillas en el tramo anterior, tamaño de cutings más pequeños por el grado de fracturamiento.
136	147	IGNIMBRITA rosada igual a la anterior, con pátinas de arcilla amarilla en fracturas. Alto de arcillas rosadas. Zona fracturada.
147	165	IGNIMBRITA rosada oscura misma unidad anterior, con escasas arcillas amarillas en pátinas.
165	170	IGNIMBRITA rosada oscura misma unidad, ligero aumento de arcillas amarillentas y rosadas.
170	176	IGNIMBRITA rosada oscura, aumento en el porcentaje de arcilla rosada y amarilla.
176	187	IGNIMBRITA rosada oscura similar a la anterior, sin arcillas rosadas y muy pocas pátinas de arcillas amarillas.
187	192	IGNIMBRITA rosada oscura, igual a la anterior con ligero aumento de pátinas de arcillas amarillas.
192	197	IGNIMBRITA rosada oscura igual a la anterior con aumento de pátinas de arcillas amarillas en fracturas.
197	200	IGNIMBRITA rosada oscura, relleno de fracturas con arcillas.
200	212	IGNIMBRITA rosada oscura, disminuye el contenido de arcillas.
212	230	IGNIMBRITA rosada oscura a gris rosada, misma unidad, ligero aumento en el contenido de arcillas en pátinas y ligero cambio de color, más grisáceo y silíceo.
230		FIN del pozo

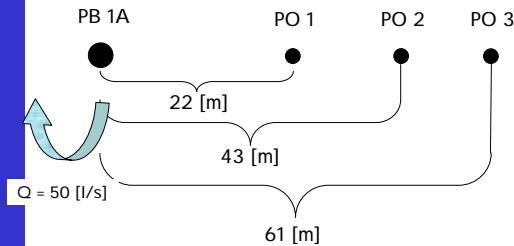
## Habilitación del Pozo

De [m]	Hasta [m]	Criba [m]	Ciego [m]	Descripción
0	72	0	72	Ciego 16"
72	114	42	0	Criba slot 40, 16"
114	120	0	6	Ciego 16"
120	150	30	0	Criba slot 40, 16"
150	156	0	6	Ciego 16"
156	204	48	0	Criba slot 40, 16"
204	210	0	6	Ciego 16"
210	224	14	0	Criba slot 40, 16"
224	230	0	6	Ciego 16", con punta de lápiz
Total		134	96	[m]

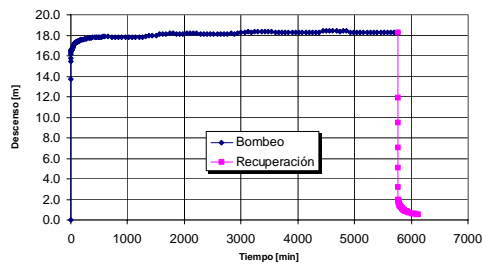
Cribas

## Esquema Prueba de Bombeo (EJ 2)

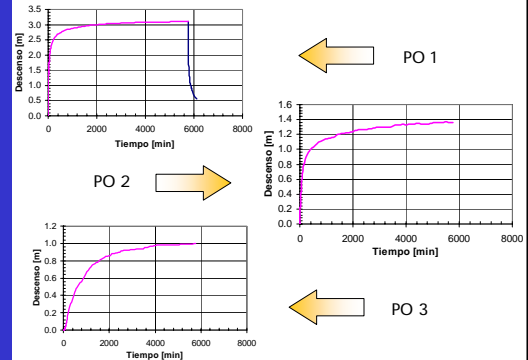
Pozo de Bombeo



## Niveles v/s Tiempo Pozo de Bombeo



## Niveles v/s Tiempo Pozos Observación

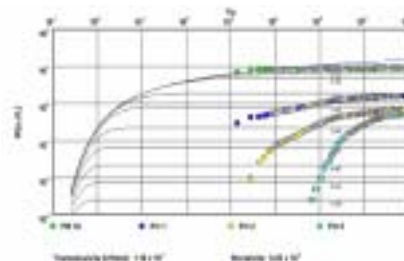




## Análisis en Aquifer Test

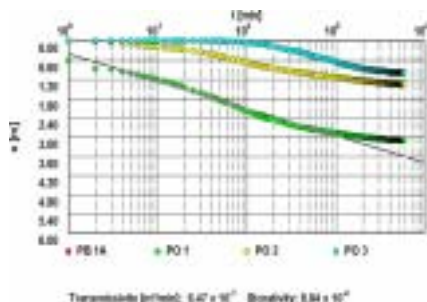


## Mejores Ajustes PB 1A



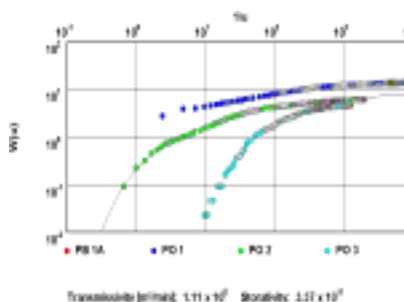
Hantush Acuitardo

## Mejores Ajustes PO 1



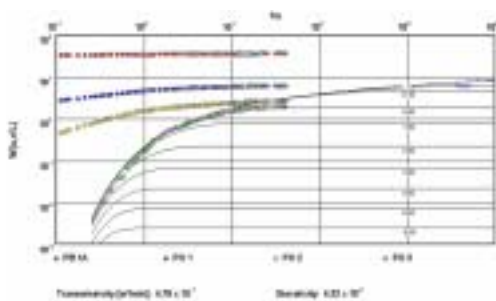
Cooper & Jacob Acuífero Confinado

## Mejores Ajustes PO 2



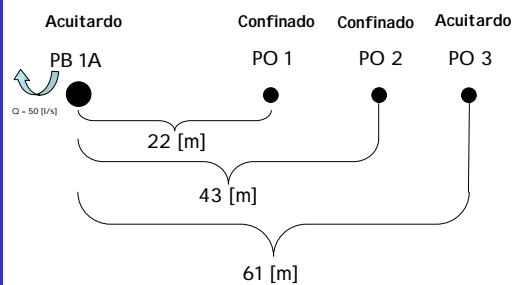
Theis Acuífero Confinado

## Mejores Ajustes PO 3



Hantush Acuitardo (Poco filtrante)

## Mejor Ajuste





### Resultados Obtenidos

#### Mejores Ajustes para Cada Prueba

Pozo	Tipo	Ajuste	T [m³/día]	K [m/día]	S [-]
PB 1A	Bombeo	Hantush	171.4	1.3	-
PO 1	Obs	Cooper & Jacob	931.7	4.0	8.8E-04
PO 2	Obs	Theis	1584.0	6.7	3.4E-03
PO 3	Obs	Hantush	685.4	2.9	4.3E-02

#### Ajustes Theis y Cooper & Jacob

Pozo	Tipo	Theis			Cooper & Jacob		
		T [m³/día]	K [m/día]	S [-]	T [m³/día]	K [m/día]	S [-]
PB 1A	Bombeo	236.2	1.8	-	1203.8	9.0	-
PO 1	Obs	1038.2	4.4	4.7E-04	931.7	4.0	8.8E-04
PO 2	Obs	1584.0	6.7	3.4E-03	1670.4	7.0	2.9E-03
PO 3	Obs	892.8	3.8	5.0E-02	1189.4	5.1	3.1E-02

#### Prueba de Recuperación

Pozo	Tipo	Metodo de Recuperación Cooper & Jacob		
		T [m³/día]	K [m/día]	S [-]
PB 1A	Bombeo	789.1	3.9	-
PO 1	Obs	889.9	3.8	-

¿Es mejor la prueba de recuperación?

### Resultados Obtenidos

Pozo	Tipo	Theis			Cooper & Jacob		
		T [m³/día]	K [m/día]	S [-]	T [m³/día]	K [m/día]	S [-]
PB 1A	Bombeo	236.2	1.8	8.2E-03	1203.8	9.0	2.5E-23

Fuera de rango, debido a pérdidas de carga cerca del pozo

### Cálculo de Radio de Influencia

Se estimará el radio de influencia para el pozo, utilizando dos métodos

- Método de Jacob distancia.
- Método de Jacob (de expresión de Jacob)

### Cálculo de Radio de Influencia: Jacob Distancia

Distancia [m]

Descenso [m]

$y = -1.7494\ln(x) + 8.6248$   
 $R^2 = 0.9998$

### Cálculo de Radio de Influencia: Jacob Distancia

Q = 50 [l/s]  
t = 4 días  
 $r_0 = ?$  [m]

$$T = \frac{2.3Q}{2\pi \Delta s}$$

$$S = \frac{2.25 \cdot T \cdot t}{r_0^2}$$

Resultados obtenidos:

$r_0 = 139$  [m]

T	392.6	[m³/día]
K	2.9	[m/día]
S	0.18	[-]

### Cálculo de Radio de Influencia: Cooper & Jacob

Formula Utilizada:

$$R = 1.5 \sqrt{t \cdot \frac{T}{S}}$$

Resultados Obtenidos:

Pozo	T [m³/día]	S [-]	t [día]	R [m]
PB 1A Hantush	171.4	-	4	-
PO 1 Cooper	931.7	8.8E-04	4	3080
PO 2 Theis	1584.0	3.4E-03	4	2057
PO 3 Hantush	685.4	4.3E-02	4	377
PB 1A	1203.8	-	4	-
PO 1	985.0	6.8E-04	4	3613
PO 2	1627.2	3.1E-03	4	2163
PO 3	1041.1	4.1E-02	4	480

Mejores Ajustes

Promedio Theis y Cooper & Jacob

Derechos de aguas subterráneas en Chile, se piden con un área de protección de  $r_0$  [m] de radio



### Datos de Calidad del Pozo

1. PARÁMETROS FÍSICOS	Límite Máximo	Valor Medido
Turbiedad (UNT)	5	0.7
Color (Pt – Co)	20	Aparente 10.0 – Real 0.0
Olor	Inodoro	Inodoro
Sabor	Insípido	Insípido

PH 17° C	6-8.5	6.7
----------	-------	-----

Conductancia	570
Color Aparente (Pt – Co)	10
Ph Saturación Larson	7.8
Índice Langelier	- 1.8 Tendencia Corrosiva
Índice de Agresividad	11.0 Mod. Agresiva
Residuo Total (mg/l)	410.0
Residuo Disuelto (mg/l)	395.0
Residuo Fijo (mg/l)	355.0
Residuo Volátil (mg/l)	40.0
Residuo Suspendido (mg/l)	15.0
Residuo Sedimentable (mg/l)	-

### Datos de Calidad del Pozo

2. PARÁMETROS QUÍMICOS	Expresión	Límite Máximo (mg/l)	Concentración Medida (mg/l)
Amonio	N	0.25	0.00
Asenito	As	0.05	<0.001
Cadmio	Cd	0.05	<0.001
Cianuro libre	CN	0.2	<0.005
Cromo	Cr	250	0.3
Cobre	Co	1	0.003
Cupreo	Pb	0.05	<0.001
Cinco Metales	Co	0.05	<0.001
Fluoruro	F	1.5	0.19
Mercurio	Hg	0.05	0.177
Molibdeno	Mo	0.07	0.001
Níquel	Ni	0.05	0.001
Plomo	Pb	0.05	0.001
Selenio	Se	0.05	0.001
Silicio	Si	0.05	0.001
Sulfato	SO <sub>4</sub>	250	18
Talio	Tl	0.05	0.001
Vanadio	V	0.05	0.001
Zinc	Zn	5	0.04

Acidez	CaCO <sub>3</sub>	0.0
Alcalinidad Total	CaCO <sub>3</sub>	82.0
Alcalinidad Fenolphtaleína	CaCO <sub>3</sub>	0.0
Aluminio	Al	0.007
Anhidrido Carbónico	CO <sub>2</sub>	16.5
Bicarbonatos	CaCO <sub>3</sub>	82.0
Carbonatos	CaCO <sub>3</sub>	0.0
Calcio	Ca	87.90
Dureza Total EDTA	CaCO <sub>3</sub>	289.50
Dureza Magnésica	CaCO <sub>3</sub>	69.70
Dureza Cálcica EDTA	CaCO <sub>3</sub>	219.80
Hierro Total	Fe	0.177
Fosfatos	PO <sub>4</sub>	0.430
Nitrogeno Ammoniacal	N	0.120
Nitrito	N	3.59
Silicatos	SiO <sub>2</sub>	2.60
Sodio	Na	23.90
Boro	B	0.05
Litio	Li	0.002
RAS		0.81
RAS Corregido		0.65
Sodio Porcentual (%)		15.2
Molibdeno	Mo	0.005

- PRUEBA GASTO VARIABLE Y CONSTANTE
- EJEMPLOS DE PRUEBAS DE BOMBEO
  - Pozo de bombeo con Pozo de Observación (Ej 1)
  - Pozo de bombeo con tres pozos de Observación (Ej 2)
  - Pozo de bombeo con recuperación (Ej 3)
  - Pozo de observación acuífero libre (Ej 5)

### EJ 3: Características Pozo

- Pozo de producción de agua.
- Profundidad perforada: 186 [m]
- No se encuentra roca basal durante la perforación.

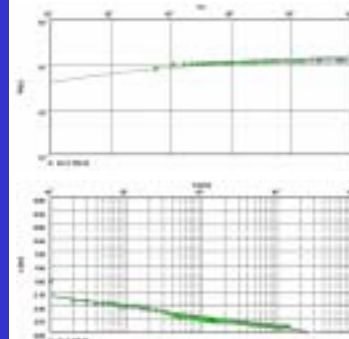
De (m)	Hasta (m)	Criba (m)	Ciego (m)	Descripción
0	91	0	91	Ciego 6"
91	108	17	0	Criba slot 40, 6"
108	121	0	13	Ciego 6"
121	150	29	0	Criba slot 40, 6"
150	157	0	7	Ciego 6"
157	162	5	0	Criba slot 40, 6"
162	169	0	7	Ciego 6"
169	186	17	0	Criba slot 40, 6"
186	0	0	0	Ciego 6"
Total		68	118	[m]

Habilitación  
del Pozo

### Estratigrafía

De (m)	Hasta (m)	DESCRIPCIÓN
0	19	CENIZA gris con abundantes fragmentos de andesita, roca
19	24	Ceniza gris con abundante cuarzo
24	30	Acilla gris limosa plástica a ceniza redondeada en forma
30	58	Ceniza gris clara casi blanca con cristales de biotita y cuarzo
58	60	Acilla gris con fragmentos de ceniza
60	62	Ceniza gris clara
62	66	Ceniza arcillosa gris clara (arcilla gris)
66	89	Acilla limosa (limos) color café rojizo con +/- 1% de fragmentos angulosos, principalmente de sílice blanca algo argilizada y rocas volcánicas andesíticas y ríolíticas
89	108	Acilla con grava color pardo rojizo. Ligero aumento en el porcentaje de fragmentos de sílice y volcánicos.
108	110	Acilla parda. Nivel mas arcilloso
110	126	Acilla con clastos de grava. Misma unidad, cambio gradual en el color de las arcillas, de pardo rojizo a pardo amarillento. Totalmente argilizada
126	142	Acilla con clastos de grava color pardo amarillento rojizo, aumento en el porcentaje de fragmentos de sílice blanca, de roca gris clara silicificada, roca gris verdosa clara. Fragmentos +/- 5 % angulosos
142	147	Acilla con clastos de grava pardo amarillento hasta los 144 m y con tinte rojizo claro hasta los 147 metros. Fragmentos de ríolitas (granulitas?) gris verdosa clara silicificadas angulosas
147	150	Acilla, cambio fuerte de color, rojo intenso. Fragmentos +/- 2-3% fragmentos de ignimbritas (?) o ríolitas (?) gris verdosa clara silicificada, a ignimbrita totalmente alterada a arcilla?
150	155	Acilla pardo amarillento clara y levemente con argilización
155	159	Acilla rojo intenso. Algunos fragmentos con textura relucida
159	162	Acilla rojo intenso. Fragmentos de microporosa ríolítica roca con argilización pervasiva verosa de hematita
162	171	Microvulcánica ríolítica. Fragmentos angulosos 1-2 mm de cuarzo, plagioclasas y andesitos grises en matriz silicificada y terfida por hematita y ironitas. Roca argilizada, menos que en tramos anteriores
171	174	Textura original parcialmente preservada en algunos fragmentos
174	186	Andesita? Roca blanqueada, argilizada, blanca con algo de hematita
186		Andesita gris, textura porfírica, abundante arcilla gris blanca rellenando fracturas

### Prueba de Bombeo PB 2A

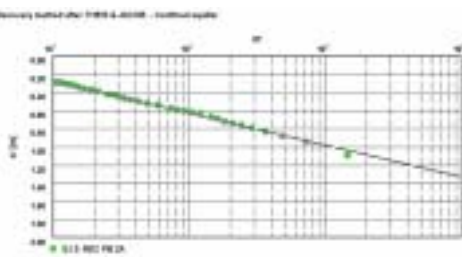


Theis

Cooper y Jacob  
o Jacob Tiempo



### Prueba de Bombeo PB 2A



Prueba de Recuperación

### RESUMEN DE PERMEABILIDADES

Método	T [m <sup>2</sup> /min]	K [m/min]	S [-]
Theis	63.22	0.9	-
Cooper & Jacob	94.46	1.4	-
Recuperación	91.73	1.3	-

### DATOS A OBTENER EN PRUEBAS DE BOMBEO

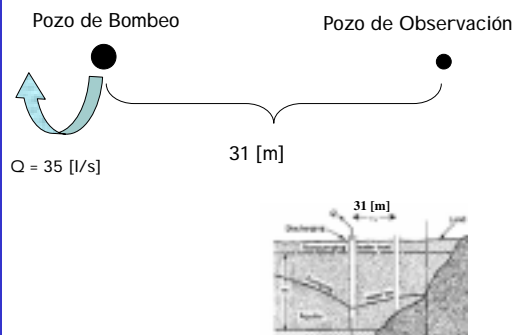
#### EJEMPLOS DE PRUEBAS DE BOMBEO

- Pozo de bombeo con Pozo de Observación (Ej 1)
- Pozo de bombeo con tres pozos de Observación (Ej 2)
- Pozo de bombeo con recuperación (Ej 3)
- Pozo de observación acuífero libre (Ej 5)

### EJ 4: Características Pozo

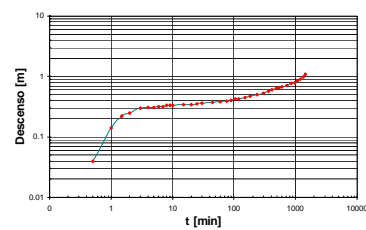
- Acuífero libre.
- Pozo completamente penetrante.
- $Q = 35$  [l/s]
- Espesor Saturado 24 [m]
- Distancia Pozo de Observación 31 [m]

### Esquema Prueba de Bombeo (Ej 1)



### Prueba de Gasto Constante

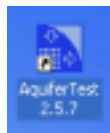
Niveles v/s tiempo en Pozo de Observación



Forma Acuífero Libre



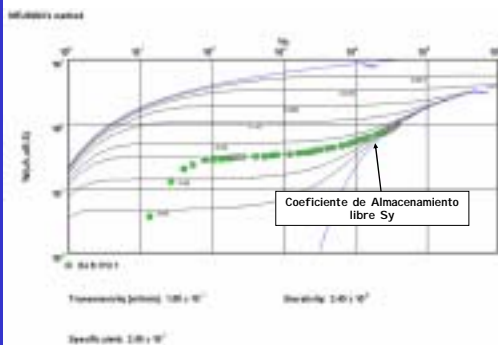
## Análisis en Aquifer Test



### Ajuste Zona Confinada: EC De Neuman



### Ajuste Zona Libre: EC De Neuman



### RESUMEN DE Resultados

T (m <sup>2</sup> /min)	1.55E-01
T (m <sup>2</sup> /dia)	223.2
K (m/dia)	9.3
S (-)	0.0006 Acuífero Confinado
Sy (m/m)	0.24 Acuífero libre
Sy (t/m)	0.010

## FIN AUXILIAR

