

## **CAPÍTULO I**

### **1. GENERALIDADES**

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

La Entidad Prestadora de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (EPSA) correspondiente a la ciudad de Tarija, la COOPERATIVA DE SERVICIO DE AGUA Y ALCANTARILLADO DE TARIJA (COSAALT LTDA.), se viene trabajando para poder contar con los parámetros hidrogeológicos correspondientes de un acuífero, más específicamente en un pozo y los radios de influencia, esto es de gran necesidad para poder tener un mejor control y monitoreo de dichos pozos.

Al no contarse con dichos parámetros y radios de influencia no se puede garantizar el eficiente bombeo de un pozo además de que no se sabe cómo afectaría al perforarse un nuevo pozo cercano a otro, como ocurre en la actualidad que se tiene varios pozos cercanos, unos que si todavía son usados y otros que ya fueron clausurados o tapados. Es por esta razón que me decidí en determinar los parámetros hidrogeológicos de un pozo como ser el de permeabilidad (K), transmisibilidad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) que permiten saber cómo será la reacción de un pozo al momento de ser bombeado, así también el radio de influencia de un pozo.

La EPSA correspondiente a Tarija COSAALT tiene a su cargo 56 pozos (4 de ellos que ya fueron clausurados) de los cuales no se cuentan con estos parámetros hidrogeológicos antes dichos ni de los radios de influencia.

#### **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la ciudad de Tarija provincia Cercado, desde que se tiene registros de los pozos perforados con ayuda de la misión china FASE I que datan desde 1992-1994 se tienen pocos o nada de datos de los parámetros hidrogeológicos de los pozos de bombeo, es decir, cuando se culminaba con la perforación del pozo, solo se hacían pruebas en algunos de ellos para ver hasta dónde descendía el nivel dinámico y así tener un aprovechamiento óptimo de este.

De todas estas pruebas no se registraron los parámetros hidrogeológicos como la permeabilidad, transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento, además de los radios de

influencia. Es por esta razón que los pozos que actualmente están siendo usados por COSAALT LTDA., son bombeados desconociendo cual es la eficiencia de bombeo, se desconoce cuál es el caudal de explotación óptimo que soporta el acuífero.

Desde el inicio de la perforación de pozos no se realizaron estudios de estos parámetros hidrogeológicos hasta la fecha, tampoco se tiene los datos de las pruebas de bombeo que se realizaron en algunos pozos, por esta razón, en coordinación con la EPSA de Tarija, COSAALT LTDA., y la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO” se está procediendo a realizar dichas pruebas en ciertos pozos para poder determinar sus parámetros hidrogeológicos y radios de influencia, para así tener un eficiente bombeo en los pozos y mejorar su eficiencia.

### **1.3. HIPÓTESIS**

Los parámetros hidrogeológicos ayudarán a planificar con mayor eficiencia el bombeo en los pozos perforados, y los radios de influencia determinarán la distancia mínima que deberá perforarse un nuevo pozo de producción para que este no afecte a la eficiencia de bombeo en los pozos, para una gestión racional y eficiente de explotación de los recursos hídricos subterráneos.

### **1.4.OBJETIVOS**

#### **1.4.1. GENERAL**

- Determinar los parámetros hidrogeológicos (permeabilidad, transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento) y radios de influencia de ciertos pozos que están en el área de concesión de COSAALT.

#### **1.4.2. ESPECÍFICOS**

- Realizar las pruebas de bombeo en los pozos “STADIUM A y PN”;”VILLA FATIMA A y B”;”MORROS BLANCOS A y B” pertenecientes a COSAALT.
- Determinar el coeficiente de permeabilidad (K).
- Determinar la transmisividad (T) de los pozos.
- Determinar el coeficiente de almacenamiento (S).
- Calcular el radio de influencia de los pozos de acuerdo a pruebas de bombeo.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA**

Llama mucho la atención que en el tema de aguas subterráneas no se cuenta con una norma clara para el uso de este recurso que es muy importante tanto para la ciudad de Tarija y el país, por ahora solo se cuenta con la Resolución Administrativa Regulatoria RAR AAPS N° 01/2014 de la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua potable y Saneamiento (AAPS) que instruye a las EPSA que deben regular todos los Sistemas de Autoabastecimiento de Recursos Hídricos (SARH) que generan un bien o servicio a través de su explotación, pero esta resolución no regula aspectos técnicos de la construcción de los pozos profundos (distancia mínima entre pozos, métodos de construcción, cálculo de parámetros hidrogeológicos y otros)

De acuerdo a la NB-689 “Reglamentos técnicos para diseños de sistemas de agua potable” solo hace referencia a la construcción de los pozos de agua potable, y establece que cuando no existe información sobre pruebas de bombeo que hayan determinado el radio de influencia la distancia mínima entre pozos debe ser de 500 metros, para pruebas de bombeo solo indica los tiempos y periodos para la realización de ésta, es así que no se muestra la manera adecuada de cómo realizar las pruebas de bombeo, como obtener los parámetros hidrogeológicos y parámetros hidráulicos.

Es por esta razón que me motiva a realizar una investigación sobre este tema muy importante para la ciudad, pues se podrá realizar un mejor control para la perforación de pozos y los bombeos de agua subterránea, con pruebas de bombeo donde se pueden determinar mediante éstas los parámetros hidrogeológicos y radios de influencia.

## **1.6. LIMITACIÓN DEL ESTUDIO**

Siendo COSAALT LTDA. la EPSA de la ciudad de Tarija, es la primera encargada en la dotación de agua para el consumo de la población. Es por esta razón que en cuanto llega la época de estiaje varios de los pozos que se tienen entran en operación, teniendo en prioridad la dotación de agua, para la prueba de bombeo se necesita que el pozo de bombeo debe estar al menos 24 horas en reposo, es decir, que debe estar apagada la bomba, ésta condición básica para llevar adelante una adecuada prueba no nos permite proceder por el hecho de que apagar la bomba de un pozo significa dejar 24 horas sin agua a ciertos lugares de la población, en efecto la gente afectada por el corte daría sus reclamos respectivos,

además que al tercer día de la prueba se debe dejar recuperar los niveles de agua por un periodo de 24 horas como mínimo. Y de la misma manera se verían afectados los beneficiarios haciendo su posterior reclamo.

La siguiente limitación que también influye de alguna u otra manera, es la de la prueba misma de bombeo, al hacerla manual requiere que se esté permanentemente midiendo los niveles de descensos, haciendo que se necesiten si o si personal en el lugar para realizar estas mediciones. Se podrían usar nuevas tecnologías (level logger) que midan automáticamente los niveles, pero no se cuenta en COSAALT con este instrumento, por este motivo se tendría que alquilar de otra empresa haciendo que se eleven los costos de la prueba.

### **1.7. ALCANCE DEL TRABAJO**

Se tiene por alcance la determinación de los parámetros hidrogeológicos como ser: transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento y permeabilidad del pozo además del radio de influencia, también se pretende dejar digitalizando y actualizando algunos perfiles litológicos de los pozos y perfiles de filtros.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. MARCO CONCEPTUAL

##### 2.1.1. AGUA SUBTERRÁNEA Y ACUÍFEROS

El agua subterránea es el agua que está contenida en los espacios porosos de la zona saturada del subsuelo. Puede ser entendida como una parte o uno de los “estados” del agua en su circulación en el ciclo hidrológico. Circula y se acumula por debajo de la superficie del suelo –en el subsuelo- ocupando espacios porosos grietas o fisuras de capas arenosas o de material grueso formado por grava o rocas fracturadas.

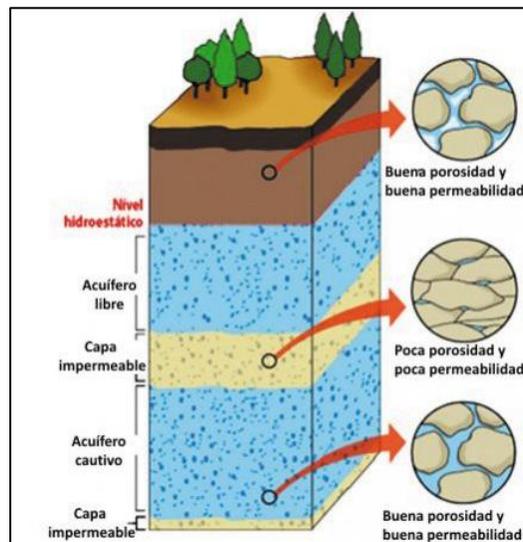


Figura 1: Agua subterránea y tipos de acuíferos

Fuente: Diario norte (2017).

La fuente principal de las aguas subterráneas es la lluvia que infiltra directamente en el suelo y luego pasa a capas más profundas del subsuelo. También es una fuente importante el agua que infiltra de las corrientes o fuentes de agua superficial en zonas elevadas (ríos, arroyos, quebradas, lagos). Se mueve lentamente desde las zonas con alta elevación y presión (zonas de recarga) hacía las zonas con baja elevación y presión (zona de descarga), pudiendo esta salir nuevamente a la superficie y retornar a la red fluvial (manantiales, ríos y lagos).

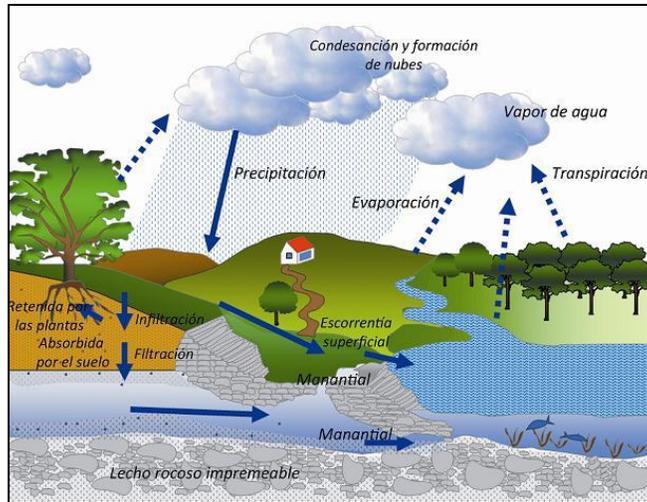


Figura 2: Ciclos del agua

Fuente: supplies, 2017

Las formaciones geológicas que tienen la capacidad de almacenar y transmitir el agua se denominan de manera general “**acuíferos**”. Las propiedades de almacenar y transmitir agua de estos acuíferos están en función de su composición (tipo de material que lo compone) y origen, su disposición (tamaño espesor y ubicación) y las propiedades hidráulicas de estos materiales (permeabilidad, transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento). Según su estructura y comportamiento hidráulico se clasifican en acuíferos libres, semi-confinados y confinados.

(Ministerio de Medio Ambiente y Agua [MMAyA], 2018)

### 2.1.2. TIPOS DE ACUÍFEROS Y SU COMPORTAMIENTO

Según sus circunstancias hidráulicas y estructurales se denominan los siguientes acuíferos:

- a) **Acuíferos libres:** Son aquellos en los que el nivel del agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. El agua que ceden es el agua que tienen almacenada en sus poros. Este volumen de agua es alto en comparación a los acuíferos que se comentan a continuación, y por ello tienen bastante inercia. Los conos de bombeo (abatimiento) suelen ser esbeltos, es decir, con elevados descensos de nivel en el pozo y corto de radio de influencia.

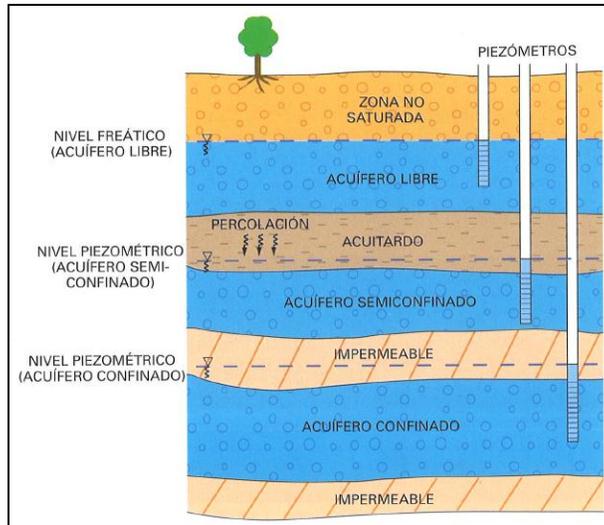


Figura 3: Pozos excavados y perforados

Fuente: Martínez P. A., 2006

- b) Acuíferos confinados:** Son aquellos que están absolutamente aislados en el subsuelo, es decir, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel del agua en los acuíferos confinados está por encima del techo de dicho material del acuífero. En realidad están a presión por las cargas de los materiales que están encima de ellos. No existen acuíferos confinados o cautivos por el hecho de que ningún material es absolutamente impermeable capaz de aislarlos, aunque a efectos prácticos serán considerados como tales.

Son acuíferos rápidos con muy poca inercia, debida a su baja capacidad de almacenar agua, que reaccionan, o transmiten en seguida las influencias del bombeo puntual. Los conos de bombeo suelen ser de menor altura que en los libres pero con radios de influencia largos.

- c) Acuíferos semi-confinados:** En ellos los materiales que lo rodean no son todos impermeables. Así, el paquete superior o semiconfinante lo constituyen formaciones semipermeables, que permiten el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado. Consecuentemente la velocidad de reacción a los bombeos de estos acuíferos es más moderada que en los confinados y los radios de influencia tienen valores medios entre los confinados y los libres.

(Carballo, 2012)

### 2.1.3. CAPTACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea se capta principalmente mediante pozos verticales, siendo estos los más conocidos a nivel mundial, y también mediante pozos horizontales como galerías filtrantes y zanjas de drenaje. Un pozo se proyecta y se construye para obtener agua del acuífero, con el objetivo de satisfacer la demanda determinada. La vida útil de un pozo es de décadas, pero cuando este se agota se procede al abandono del pozo mediante el sellado.

En este caso se hablara solamente de pozos verticales.

#### 2.1.3.1. POZOS VERTICALES

Se dividen en 2 pozos abiertos, excavados o brocales y los pozos perforados o tubulares

- a) **Pozos abiertos, excavados o brocales:** Son pozos someros de construcción manual o ligeramente mecanizada y con diámetros relativamente grandes (> 1m). Es posible excavar hasta alcanzar el nivel freático.
- b) **Pozos perforados o tubulares:** Son los pozos más utilizados para captación de agua subterránea, se los conoce también como pozos semisurgentes. Son generalmente de diámetro reducido de 6 a 12 pulgadas de diámetro, su construcción se realiza mediante máquinas perforadoras con diferente sistema de acuerdo al material del acuífero a atravesar.

(Martínez, 1984)



*Figura 4: Pozos excavados y perforados*

*Fuente: Francisco, 2012*

#### **2.1.4. TIPOS DE PRUEBAS DE BOMBEO**

Existen diferentes tipos de prueba de bombeo, a continuación se describen las particularidades de cada tipo:

##### **a) A caudal constante**

En esta prueba no varía el caudal durante toda la prueba. Este tipo de pruebas se conocen también como pruebas de bombeo de “Larga Duración”, por lo que para estas pruebas se recomienda una duración de 72 horas en acuíferos libres y de 24 horas en acuíferos confinados.

- Régimen permanente. Se llega a esta situación si los niveles dinámicos en el pozo de bombeo se estabilizan a partir de un tiempo y ya no varían con el bombeo. Esto implica que el acuífero actúa como transmisor de la recarga y que el bombeo no toma agua del almacenamiento.

- Régimen variable. En este caso, los niveles dinámicos en el pozo van variando durante toda la prueba, lo que significa que el agua extraída procede total o parcialmente del almacenamiento del acuífero.

##### **b) A caudal variable**

- Bombeo a caudal crítico. Esta prueba consiste en mantener la depresión del nivel dinámico fijo muy cercano a la bomba y medir como va variando el caudal con el tiempo. Se realiza exclusivamente para acuíferos colgados, que usualmente son acuíferos de pequeña extensión y capacidad.

- Bombeos escalonados. El caudal se aumenta tres o cuatro veces a lo largo de la prueba, por ejemplo en proporción 1, 2, 4, 8 (l/s) pero se mantiene constante dentro de cada escalón. Con cada caudal los tiempos de bombeo son los mismos, por ejemplo 1 hora. Conviene establecerlos de forma que el último caudal quede alrededor del caudal de explotación del pozo o preferiblemente algo por encima. Esta prueba permite estimar el rendimiento del pozo (caudal de explotación y eficiencia del pozo) y debe realizarse antes de la prueba de larga duración, ya que permite estimar el caudal constante con que será bombeado el pozo durante 24 o 72 horas, según el tipo de acuífero.

### **c) Ensayos de recuperación**

Se interpreta la evolución de los niveles en el propio pozo de bombeo durante la recuperación de éstos tras un ensayo de bombeo. Dado que usualmente las pruebas de bombeo se realizan incluyendo uno o más pozos de observación (pozos en los que no se bombea pero se mide la variación del nivel estático), los datos del descenso freático y de la recuperación en estos pozos, son también útiles para determinar las propiedades hidráulicas del pozo y/ del acuífero.

La elección del tipo prueba de bombeo a realizar y la interpretación del mismo en un acuífero dado requiere conocer las condiciones de contorno de la zona del acuífero que se quiere estudiar (características del pozo, profundidad de captación y de bombeo, espesor total y espesor saturado del acuífero, extensión del acuífero, heterogeneidad espacial, etc.) y disponer de un modelo conceptual previo de funcionamiento del acuífero que permita elegir el tipo de prueba a realizar.

En la tabla 1 Tipos de ensayo de bombeo a caudal constante y métodos de interpretación a usar en el estudio de acuíferos confinados, semiconfinados o libres. Según el tipo de acuífero, hay diversos tipos de ensayo, y cada cual propone determinados métodos de análisis. Por ello, es muy importante tener claros los aspectos básicos discutidos antes de seleccionar el tipo de prueba a realizar.

Tabla 1 Tipos De Ensayo De Bombeo A Caudal Constante Y Métodos De Interpretación A Usar En El Estudio De Acuíferos Confinados, Semiconfinados O Libres.

Tipos de acuíferos	Tipo de ensayo		Método de análisis
Confinado	Régimen permanente		Fórmula de Thiem
	Régimen variable	Interpretación de Descensos	Fórmula de Theis
		Interpretación de recuperación	Aproximación logarítmica de Jacob
Semiconfinado	Régimen permanente		Fórmula de recuperación de Theis
	Régimen Variable	Interpretación de Descensos	Fórmula de Glee o de Jacob-Hantush
		Interpretación de recuperación	Análisis ascensos teóricos
Libre	Régimen permanente		Fórmula de Thiem y corrección de Jacob
			Fórmula de Dupuit
	Régimen Variable	Interpretación de Descensos	Fórmula de Theis
			Aproximación logarítmica de Jacob
			Corrección de Dupuit
			Formula de Boulton
			Fórmula de Neuman
	Interpretación de recuperación	Fórmula de recuperación de Theis	

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018

### 2.1.5. TRANSMISIVIDAD

Es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua horizontalmente. Sus unidades son m<sup>2</sup>/d.

$$T = K * b$$

Dónde:

K = Permeabilidad (m/d)

b = Espesor de capa saturada (m)

### 2.1.6. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

Se refiere al volumen capaz de liberar un acuífero, al descender en una unidad el nivel piezométrico. Es adimensional y se simboliza con la letra S.

Para acuíferos libres: el coeficiente de almacenamiento, es igual a la porosidad efectiva y en general presenta extremos de 0,05 y 0,30.

En acuíferos confinados: el coeficiente de almacenamiento varía entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ .

Para acuíferos semiconfinados: el coeficiente de almacenamiento varía entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$ .

### 2.1.7. PERMEABILIDAD

La permeabilidad (K) es el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero, bajo la influencia de un gradiente unitario, a temperatura de campo.

Se refiere a la facilidad que tiene un acuífero en dejar pasar agua a su través, es el parámetro que registra mayor variación en función del material, sus unidades son m/d.

$$K = \frac{T}{b}$$

Dónde:

b = Espesor de capa saturada (m).

T = Transmisividad ( $m^2/d$ )

### 2.1.8. RADIOS DE INFLUENCIA

Es la distancia que existe desde el centro del pozo hasta el límite del cono de depresión o de abatimiento que se genera durante el bombeo. El radio de influencia de un pozo se puede estimar matemáticamente para acuíferos confinados según la ecuación de Dupuit-Thiem. Este cálculo solo deberá ser realizado si es conocido con exactitud el tiempo hasta el nivel dinámico.

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi T} \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \quad ec. (2.1)$$

Dónde:

$R_2$  = Radio de influencia (m)

$R_1$  = Distancia al pozo de observación (m)

$Q$  = Caudal de bombeo ( $m^3/d$ )

$s_1-s_2$  = Abatimiento (m)

$T$  = Transmisividad ( $m^2/d$ )

**Para acuíferos no confinados se tiene la fórmula de Braun, Färber, 2004**

$$(s_1 - s_2) * \left(1 - \frac{s_1 - s_2}{2 * b}\right) = -\frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad ec. (2.2)$$

Dónde:

$R_2$  = Radio de influencia (m)

$R_1$  = Distancia al pozo de observación (m)

$Q$  = Caudal de bombeo ( $m^3/d$ )

$s_1-s_2$  = Abatimiento (m)

$T$  = Transmisividad ( $m^2/d$ )

$b$  = Espesor del acuífero saturado

### **2.1.9. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS**

Para elegir el método de interpretación más adecuado es necesario conocer el marco geológico del acuífero y el funcionamiento hidrogeológico particular de la región donde se realizó la prueba, ya que existe un número relativamente grande de métodos, aplicable cada uno de ellos a un tipo de acuífero y un régimen de flujo determinado.

Tomando en cuenta las características del estrato que constituye la frontera superior del acuífero y considerando que el estrato que lo subyace es impermeable, se puede recomendar un esquema de la caracterización del tipo de acuífero de que se trate, mostrando además, para cada caso la curva típica abatimiento-tiempo en escalas logarítmicas. En las siguientes figuras, se presenta un esquema de caracterización y las curvas típicas para los tipos de acuíferos.

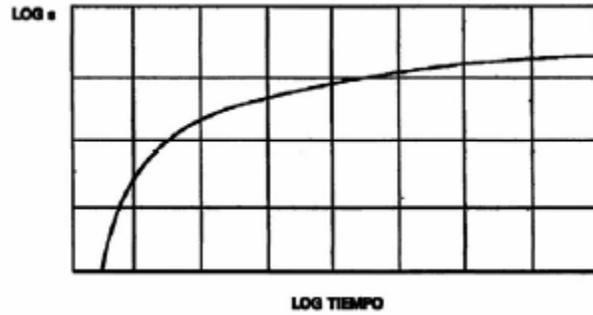


Figura 5: Curva típica de abatimiento (m)-tiempo (min) para acuífero confinado.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2017

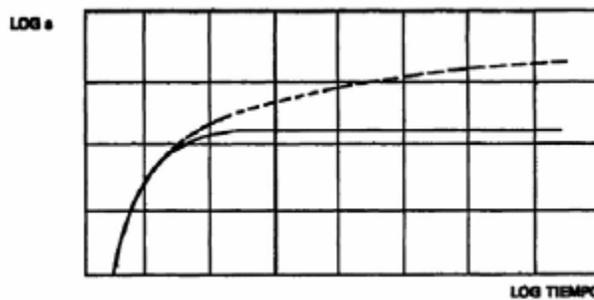


Figura 6: Curva típica de abatimiento (m)-tiempo (min) para acuífero semi-confinado.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2017

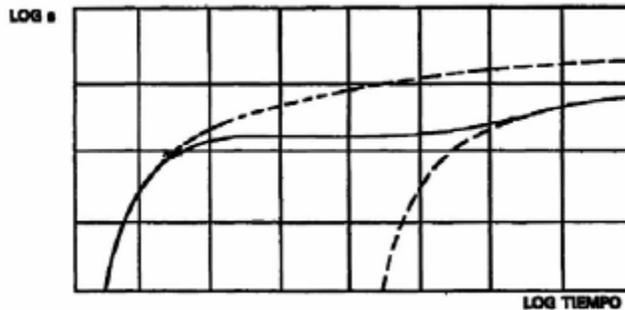


Figura 7: Curva típica de abatimiento (m)-tiempo (min) para acuífero libre

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2017

### 2.1.10. MÉTODO DE COOPER JACOB PARA ACUÍFEROS CONFINADOS

El método conocido como de "Jacob" (Cooper y Jacob, 1946) se basa en la fórmula de Theis, sin embargo, las condiciones para su aplicación son más restringidas que en el método de Theis.

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) * \int_u^{\infty} e^{-y} \frac{dy}{y} = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad ec. (2.3)$$

De la ecuación del método de Theís, se puede expandir de la siguiente forma:

$$s = \left(\frac{Q}{4\pi T}\right) \left(-0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{4} + \frac{u^3}{8} - \dots + (-1)^n \left(\frac{u^n}{n \cdot n!}\right)\right) \quad ec. (2.4)$$

Para:

$$u = \frac{u^2 S}{4\pi T} \quad ec. (2.5)$$

Dónde:

T = Transmisividad (m<sup>2</sup>/d)

S = Coeficiente de almacenamiento (adm)

s = Descensos (m)

t = Tiempo (d)

r = Distancia del pozo de bombeo al pozo de observación (m)

Q = Caudal de bombeo (m<sup>3</sup>/d)

De esta fórmula se puede concluir que u decrece conforme el tiempo de bombeo se incrementa y la distancia r al pozo de bombeo disminuye. De acuerdo a esto, para valores grandes de t y/o valores pequeños de r, los términos posteriores a lnu en la ecuación 2.4, se consideran pequeños. Por lo que, para valores de u < 0.01, el abatimiento puede expresarse como:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0,5772 - \ln \left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right)\right) \quad ec. (2.6)$$

Al considerar logaritmos naturales decimales de la ecuación, resulta lo siguiente:

$$s = \frac{2,30 Q}{4\pi T} \left(\log \left(\frac{2,25 Tt}{r^2 S}\right)\right) \quad ec. (2.7)$$

Al hacer la gráfica de los abatimientos en función del logaritmo del tiempo, se obtiene una línea recta. Esta recta se prolonga hasta interceptar al eje donde s = 0, de esta forma el

punto de intersección tiene coordenadas  $s = 0$  y  $t = t_0$ , substituyendo estos valores en la ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$0 = \frac{2,30 Q}{4\pi T} \left( \log \left( \frac{2,25 T t_0}{r^2 S} \right) \right) \quad ec. (2.8)$$

Y como,

$$\frac{2,30 Q}{4\pi T} \neq 0 \quad ec. (2.9)$$

Entonces,

$$\frac{2,25 T t_0}{r^2 S} = 1 \text{ ó } S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} \quad ec. (2.10)$$

Por otra parte, considerando la diferencia de abatimientos por ciclo logarítmico del tiempo, entonces se tiene:

$$T = \frac{2,30 Q}{4\pi \Delta s} \quad ec. (2.11)$$

Análogamente se puede demostrar que para un tiempo fijo  $t$ , la gráfica de  $s$  vs.  $r$  en papel semilogarítmico forma una línea recta y las siguientes ecuaciones son derivadas de ella:

$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} \quad ec. (2.12)$$

Y,

$$T = \frac{2,30 Q}{4\pi \Delta s} \quad ec. (2.13)$$

#### 2.1.10.1. PROCEDIMIENTO

##### Abatimiento-tiempo

- Hacer una gráfica para cada uno de los piezómetros con los valores de  $s$  en función de  $t$  en un papel semilogarítmico ( $t$  en escala logarítmica) y dibujar una recta que pase por los puntos.
- Prolongar la línea recta hasta interceptar el eje del tiempo, donde  $s = 0$  y obtener el valor de  $t_0$ .
- Determinar la pendiente de la recta

- Sustituir los valores de Q y  $\Delta s$  en la ecuación 2.13 para obtener T, con este último dato y con los valores de  $t_0$  y r, calcular S, con la ecuación 2.12

### 2.1.11. MÉTODO DE WALTON PARA ACUIFEROS SEMICONFINADOS

El método de Walton (1962) puede ser aplicado si se satisfacen las hipótesis establecidas en el método de De Glee, además de las siguientes:

- El acuitardo superior es incompresible, es decir, los cambios en su almacenamiento son despreciables
- El flujo de agua en dirección del pozo se presenta en estado permanente o transitorio.

Considerando que el almacenamiento del acuitardo es despreciable, el abatimiento en un acuífero semiconfinado está descrito por la siguiente fórmula (Hantush y Jacob, 1955):

$$s = \frac{Q}{4KD} W\left(u, \frac{r}{L}\right) \quad ec. (2.14)$$

Dónde:

$$u = \frac{u^2 S}{4\pi K D t} \quad ec. (2.15)$$

Dónde:

T = Transmisividad ( $m^2/d$ )

S = Coeficiente de almacenamiento (adm)

s = Descensos (m)

t = Tiempo (d)

r = Distancia del pozo de bombeo al pozo de observación (m)

Q = Caudal de bombeo ( $m^3/d$ )

W(u); u = Función del pozo o función de Theis, obtenida de la familia de curvas de Walton

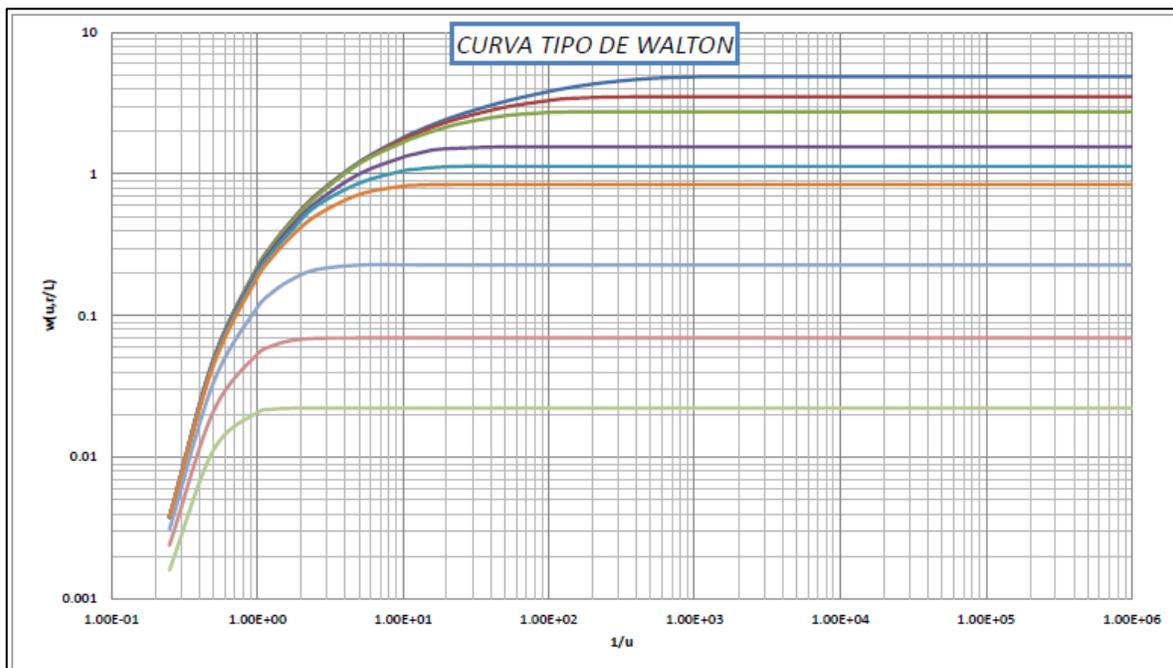
L = Factor de infiltración  $L = \sqrt{KD * C}$  (m)

C = Resistencia Hidráulica del pozo (día)

K = Conductividad del acuífero (m/d)

La ecuación de Hantush y Jacob presenta la misma forma que la ecuación de pozo de Theís, empleada para valores grandes de  $L$ , cuando el término exponencial  $(r^2/4L^2y)$  se aproxima a cero.

Tomando como base la ecuación de Hantush y Jacob, Walton (1962) desarrolló una modificación al método de ajuste de curvas de Theís. En lugar de emplear una sola curva tipo, Walton emplea una curva por cada valor de  $r/L$ . Esta familia de curvas (Figura No. 8) puede ser dibujada a partir de valores para la función  $W(u/r/L)$ .



*Figura 8: Familia de Curvas Tipo del Método de Walton.*

*Fuente: Lozada, 2016*

#### **2.1.11.1. PROCEDIMIENTO**

- Obtener la familia de curvas tipo de Walton, figura 8
- Hacer una gráfica para uno de los piezómetros, el abatimiento ( $s$ ) vs su correspondiente tiempo ( $t$ ), obteniendo la curva tiempo-abatimiento observado
- Comparar y sobreponer la curva de datos observados con alguna de las curvas tipo (Figura 8)
- Seleccionar un punto de ajuste entre las dos curvas y obtener los valores de  $W(u,r/L)$ ,  $1/u$ ,  $s$  y  $t$  para éste punto

- Substituir los valores de  $W(u, r/L)$  y  $s$  y el valor conocido de  $Q$  en la ecuación Hantush y Jacob y calcular  $KD$
- Substituir los valores de  $KD$ ,  $u$ ,  $t$  y  $r$  en la ecuación de  $u$  y obtener  $S$

(Lozada, 2016)

## **2.2. MARCO NORMATIVO**

Por ser un tema que aún no es muy estudiado en nuestro país, se tiene poca información de algunos estudios realizados en pozos de diferentes departamentos de Bolivia. Principalmente se cuenta con la norma boliviana NB689 de Agua Potable, que en uno de sus reglamentos habla sobre “REGLAMENTO TÉCNICO DE DISEÑO DE POZOS PROFUNDOS PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE” de donde se tiene los siguientes campos normativos:

### **2.2.1. DISTANCIA MÍNIMA ENTRE POZOS**

- La distancia mínima en los pozos estará fijada en función a su radio de influencia, determinada mediante pruebas de bombeo en el pozo de producción y en el pozo de observación, de acuerdo a la profundidad del mismo.
- Los datos de las pruebas de bombeo deben ser utilizados también para evaluar la interferencia entre cada uno de los pozos.
- Excepcionalmente, cuando no exista la información sobre las pruebas de bombeo que hayan determinado el radio de influencia en la zona del proyecto, la distancia mínima entre pozos debe ser al menos de 500 m.

### **2.2.2. DIÁMETRO**

- El diámetro del pozo debe ser seleccionado en función del caudal de agua requerido, características del acuífero y equipo de perforación a emplearse. Para ellos se recomienda los valores de la Tabla 2.

*Tabla 2 Relación Entre El Diámetro Del Pozo Y El Caudal De Bombeo*

Caudal a extraer (m <sup>3</sup> /h)	Diámetro útil (mm)
Hasta 40	150
Hasta 60	200
Hasta 100	250
Hasta 150	300
Hasta 220	350
Hasta 300	400

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2004*

El espacio mínimo entre la pared del pozo y el entubado debe ser de 0,05m a cada lado.

- Hasta donde vaya dispuesta la bomba, el diámetro del entubado debe tener al menos una holgura de 0,05m mayor a los tazones de la bomba.

### **2.2.3. PROFUNDIDAD**

- La profundidad del pozo debe ser tal, que logre penetrar en el acuífero, para captar el caudal requerido, con el objeto de disponer una longitud adecuada de filtros para satisfacer los requerimientos del proyecto.
- En acuíferos libres con espesores saturados inferiores a 30 m; el pozo debe penetrar todo el espesor del acuífero, para aprovechar al máximo su capacidad productiva, previendo la colocación del filtro desde el fondo hasta un máximo de la mitad del espesor saturado.
- En acuíferos confinados, el pozo debe penetrar todo el espesor del acuífero si el mismo fuera inferior a 30 m; previéndose la colocación de filtros en una extensión de 80% de espesor del acuífero.

### **2.2.4. PRUEBA DE BOMBEO**

- En las pruebas de bombeo debe utilizarse pozos de prueba, o un pozo permanente con uno o más pozos de observación, que deben estar a una distancia no menor a 15 m del pozo productor, con un diámetro mínimo de 100 mm .

- La duración mínima de la prueba de bombeo debe ser de 24 horas. Durante esta prueba se debe obtener la siguiente información:
  - Nivel estático inicial
  - Caudal de bombeo de acuerdo a espacios de 1, 3, 5, 10, 20, 40, 60 minutos, cada hora, cada dos horas y cada 3 horas, hasta completar las 24 horas.
  - Nivel dinámico de bombeo
  - Velocidad de recuperación del acuífero
  - Durante la prueba deben tomarse al menos dos muestras de agua, una en la mitad del tiempo de bombeo y la otra al final para realizar el análisis físico químico y bacteriológico.
  - Se deben medir los niveles de descenso del agua en los pozos de observación, con una exactitud de 0,10 m.
  - Elaborar un gráfico representativo de la variación del caudal-abatimiento, para determinar el caudal de explotación y otro abatimiento-tiempo, para determinar el coeficiente de transmisibilidad, capacidad específica, radios de influencia y otros parámetros hidráulicos del pozo.

(Ministerio de Medio Ambiente y Agua [MMAyA], 2004)

## CAPÍTULO III

### 3. PASOS PARA LA REALIZACIÓN DE UNA PRUEBA DE BOMBEO

#### 3.1. OBJETIVOS DE LA PRUEBA

- Determinar los parámetros hidrogeológicos y características hidráulicas de los acuíferos (Transmisividad, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y radios de influencia).
- Proporcionar los datos necesarios para determinar la capacidad específica o la relación caudal-abatimiento.

#### 3.2. TRABAJOS PREVIOS

Para determinar si es viable realizar la prueba de bombeo entre dos pozos o más, se debe primero revisar la información litológica de los mismo, verificar si los niveles de filtros y espesores de la capa saturada del acuífero coinciden en gran parte.

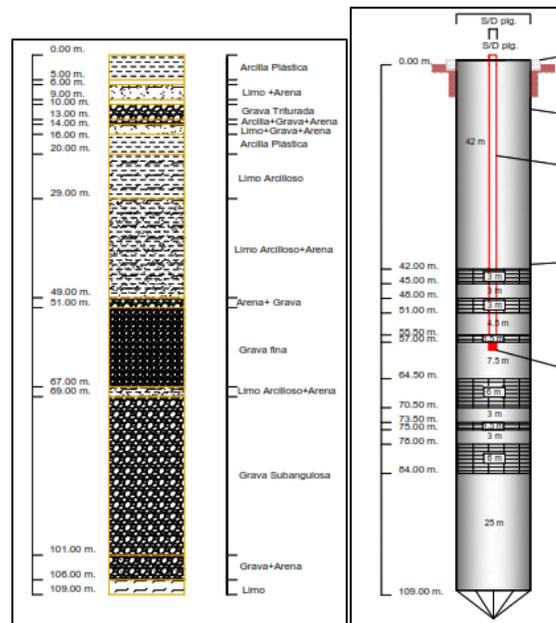


Figura 9: Perfil Litológico y perfil de filtros del pozo Stadium PN

Fuente: Elaboración propia

Una vez analizada la información se procede a verificar si existe interconexión hidráulica entre pozos, mediante el bombeo de uno de los pozos de esta prueba y verificando si existe descenso de nivel de agua en los demás pozos mientras se encuentran en reposo.

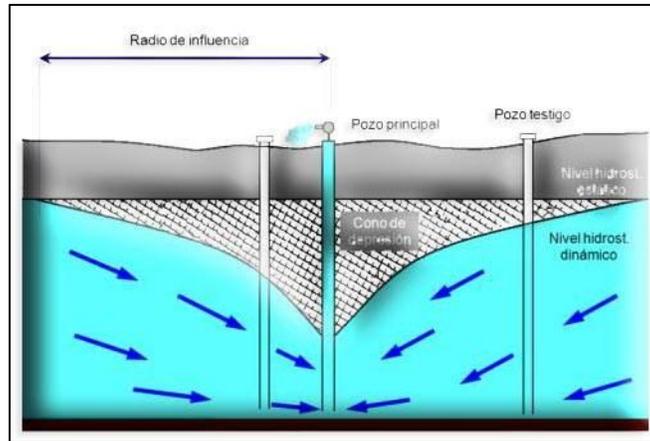


Figura 10: Diagrama de funcionamiento al momento de bombeo de pozo.

Fuente: Sebastian, 2014

Estos pasos son de mucha importancia por el motivo en que al no ser similares los perfiles se corre el riesgo que no exista interconexión hidráulica, al no existir interconexión hidráulica no se podría realizar la prueba de bombeo, ya que se necesitan dos pozos para esta prueba como mínimo.

### 3.3.MÉTODO DE ENSAYO

Se debe definir el tipo de ensayo que se realizara en la prueba, pudiendo ser:

- a) **A caudal constante**
  - Régimen permanente
  - Régimen variable
- b) **A caudal variable**
  - Bombeo escalonado

Las definiciones de cada uno se las presento anteriormente.

### 3.4. ELABORACIÓN DE PLANILLAS

Las planillas de bombeo y recuperación serán elaboradas previamente a la realización de la prueba de bombeo, en la cual, se debe especificar los intervalos de tiempo que se usaran para realizar las mediciones de descensos y recuperación de niveles de agua.

Además de las planillas de medición de niveles piezómetros, se elaborará la planilla de control de parámetros esto para la toma de muestras en sitio de la conductividad, turbiedad pH y temperatura del agua.

Los tiempos están especificados en la NB689, depende del técnico que realizara la prueba tomar esos intervalos, puesto que se pueden tomar intervalos de tiempo más pequeños para garantizar una mejor obtención de datos.

*Tabla 3 Intervalos De Tiempo Para La Lecturación De Niveles Piezométricos En Pozos.*

Nº de lectura	Tiempo a partir del inicio de bombeo	Nº de lectura	Tiempo a partir del inicio de bombeo
1	Antes de iniciar el bombeo (o antes de suspenderlo)	17	30 minuto
		18	40 minuto
		19	50 minuto
2	15 segundos	20	1 hora
3	30 segundos	21	1:20 hora
4	45 segundos	22	1:40 hora
5	1 minuto	23	2 hora
6	2 minuto	24	2:30 hora
7	3 minuto	25	3 hora
8	4 minuto	26	4 hora
9	5 minuto	27	5 hora
10	6 minuto	28	7 hora
11	8 minuto	29	9 hora
12	10 minuto	30	13 hora
13	12 minuto	31	19 hora
14	15 minuto	32	25 hora
15	20 minuto	33	31 hora
16	25 minuto	34	39 hora

*Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2017*

PRUEBA DE BOMBEO A CAUDAL CONSTANTE							
PLANILLA DE DESCENSOS				FECHA: 28 Noviembre de 2018			
RESPONSABLE: Ing. MSc. Alarcon R. Gualberto N.				NOMBRE DEL POZO: Circunvalación-A			
OBSERVADOR: Est. Univ. Tacacho C. Gustavo A.				DIAMETRO DEL POZO: 6 plg			
NIVEL ESTÁTICO INICIAL:				PROFUNDIDAD DEL POZO: 124,89 m			
DIST. AL POZO DE BOMBEO: 0 m				PROFUNDIDAD DE LA BOMBA:			
COORD x: 318987	y: 7620288	z: 1924	COD: P 3	LONG. TOTAL DE FILTROS: 22,60 m.			
FECHA	HORA REAL	HORA ACUM.	MIN. ETAPA	INTERV.	Nivel	Caudal	OBSERVACIONES
	(hh:mm:ss)	(hh:mm:ss)	(min.)	(Tiempo)	(m)	(l/s)	
25/02/2019	15:00:00	0:00:00	0	0:00:00			
	15:00:30	0:00:30	0,5	0:00:30			
	15:01:00	0:01:00	1	0:00:30			
	15:01:30	0:01:30	1,5	0:00:30			
	15:02:00	0:02:00	2	0:00:30			
	15:02:30	0:02:30	2,5	0:00:30			
	15:03:00	0:03:00	3	0:00:30			
	15:03:30	0:03:30	3,5	0:00:30			
	15:04:00	0:04:00	4	0:00:30			
	15:04:30	0:04:30	4,5	0:00:30			
	15:05:00	0:05:00	5	0:00:30			
	15:05:30	0:05:30	5,5	0:00:30			
	15:06:00	0:06:00	6	0:00:30			
	15:06:30	0:06:30	6,5	0:00:30			
	15:07:00	0:07:00	7	0:00:30			
	15:07:30	0:07:30	7,5	0:00:30			
	15:08:00	0:08:00	8	0:00:30			
15:08:30	0:08:30	8,5	0:00:30				
15:09:00	0:09:00	9	0:00:30				
15:09:30	0:09:30	9,5	0:00:30				
15:10:00	0:10:00	10	0:00:30				
15:11:00	0:11:00	11	0:01:00				
15:12:00	0:12:00	12	0:01:00				
15:13:00	0:13:00	13	0:01:00				
15:14:00	0:14:00	14	0:01:00				
15:15:00	0:15:00	15	0:01:00				
15:16:00	0:16:00	16	0:01:00				

Figura 11: Planilla de bombeo del pozo Circunvalación A.

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. LIMPIEZA DEL SITIO

Para tener una mejor circulación por el sitio, se recomienda hacer una limpieza de la maleza, alrededor del pozo de bombeo y de observación, además se debe evitar que en los pozos caigan cualquier tipo de basuras ya que en la manipulación de estos se corre el riesgo de hacer caer cualquier objeto en él.

### 3.6. EQUIPO A UTILIZAR

- Sonda de medición de niveles piezómetros:
- Cronómetro
- Cinta métrica o wincha
- Multiparamétrico

### **3.7. REALIZACIÓN DE LA PRUEBA**

Antes de la realización de la prueba de bombeo se debe dejar reposar el pozo al menos 24 horas, esto para que al momento del ensayo de bombeo se comience con el pozo estando al nivel estático tanto en el pozo de observación como en el pozo de producción.

Lo más importante durante la realización del ensayo de bombeo es la medición de los niveles piezómetros en ambos pozos estudiados, dependiendo de la etapa de la prueba (bombeo o recuperación), de acuerdo a los intervalos de tiempo antes mencionados. Paralelamente a la medición de los niveles de agua se debe aforar los caudales bombeados con cualquier método de aforo que pueda realizarse en el pozo de producción. También se realizara la toma de muestras para determinar los parámetros de calidad del agua.

La duración mínima de la prueba será de 24 horas en la etapa de bombeo y 24 horas en la etapa de recuperación.

## CAPÍTULO IV

### 4. INTERPRETACIÓN DEL ENSAYO DE BOMBEO

De acuerdo a lo obtenido a las pruebas de bombeo se realiza una gráfica de abatimiento vs tiempo en un papel logarítmico.

De las pruebas de bombeo realizadas en los pozos de COSAALT se procederá a la interpretación de los resultados de los ensayos de bombeo, se realizarán los cálculos de los parámetros hidrogeológicos y radios de influencia.

#### 4.1. POZO STADIUM

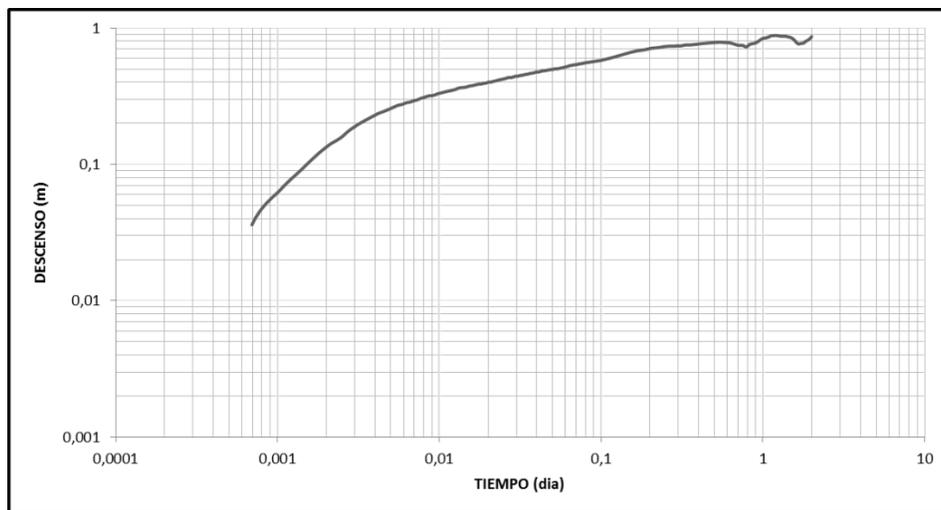


Figura 12: Curva abatimiento vs tiempo del pozo STADIUM

Fuente: Elaboración propia

Primero se realizara la clasificación del acuífero en función a la gráfica obtenida de la prueba de bombeo.

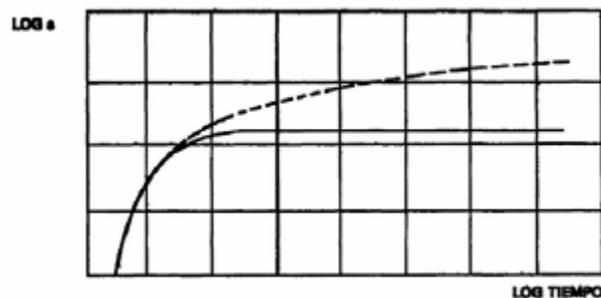


Figura 13: Curva típica de abatimiento (m)-tiempo (min) para acuífero semi-confinado.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2017

Asemejando la curva descenso vs tiempo del pozo stadium a la curva característica se acepta que el acuífero se trata de un acuífero semiconfinado, se procede a determinar el método a usar para el cálculo de los parámetros hidrogeológicos y radios de influencia.

Mediante el tipo de ensayo a caudal constante en régimen variable y un acuífero semiconfinado se opta por usar el método de Walton.

#### 4.1.1. MÉTODO DE WALTON.

Resolución

Se tiene las curvas tipo de walton

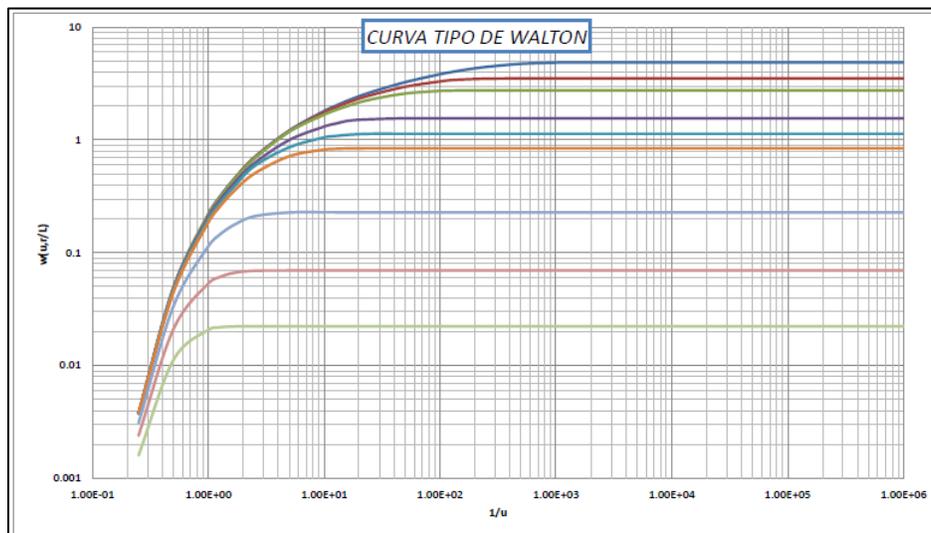
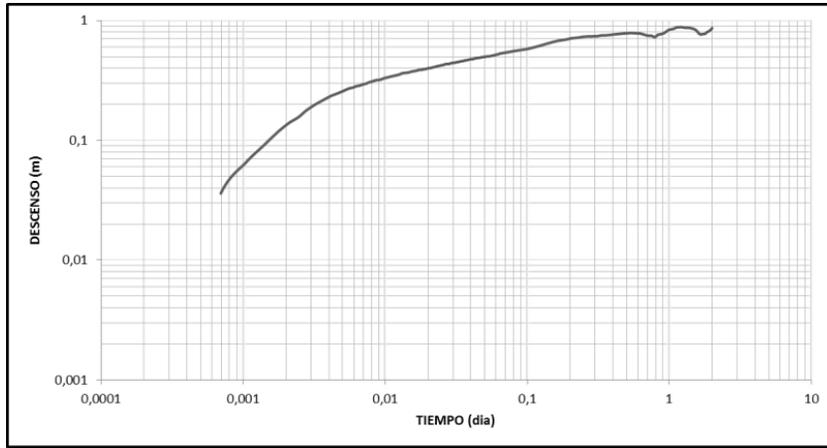


Figura 14: Familia de Curvas Tipo del Método de Walton.

Fuente: Lozada, 2016

Se debe sobreponer la curva descenso vs tiempo con la curva tipo de walton procurando que los ejes sean paralelos y de la misma escala.



*Figura 15: Curva abatimiento vs tiempo del pozo STADIUM*

*Fuente: Elaboración propia*

## Superposición

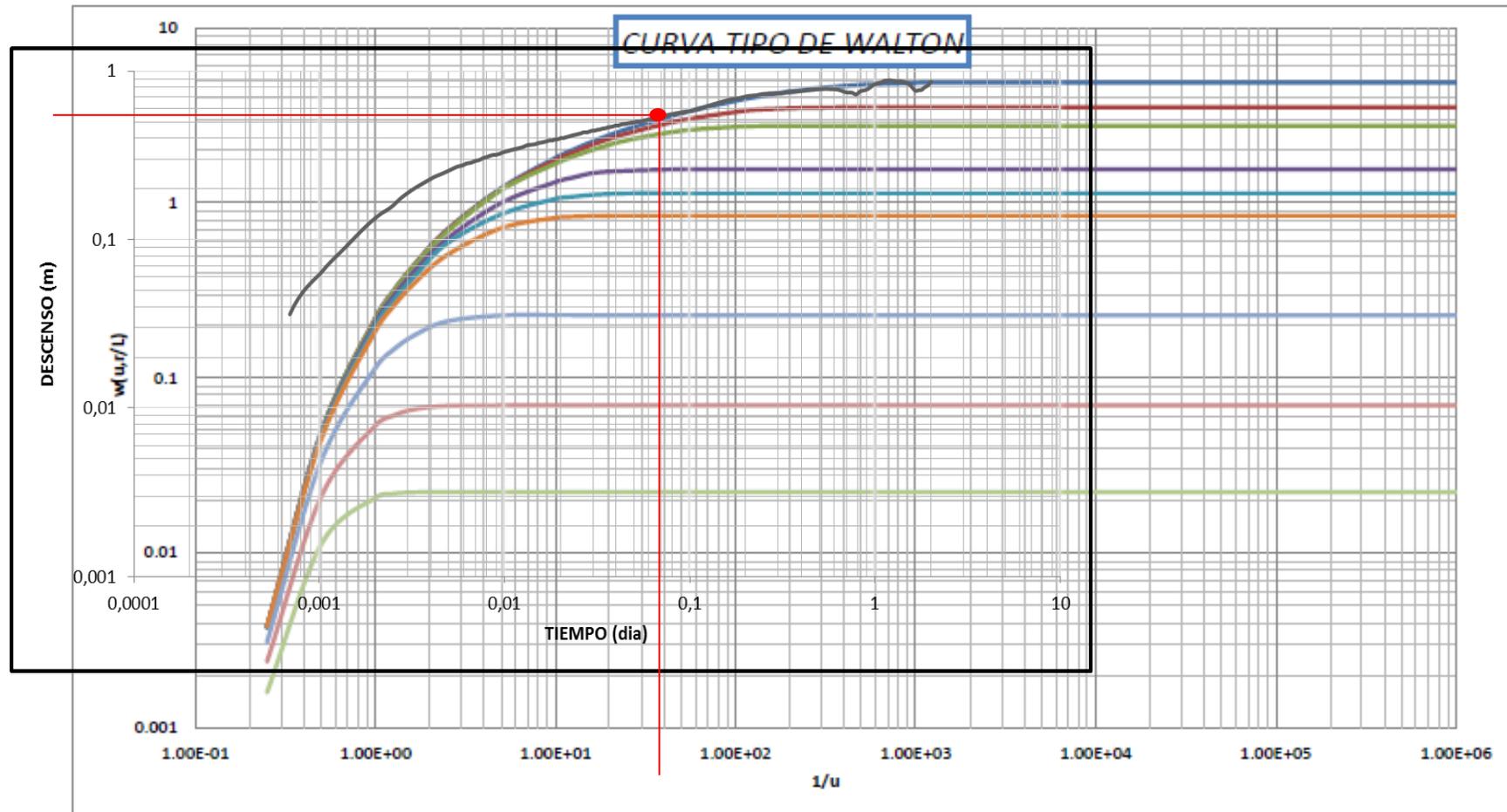


Figura 16: Superposición de curvas

Fuente: Elaboración propia

De la superposición de curvas se obtiene los siguientes datos:

- De la curva tipo de walton

$$W(u;r/l) = 3$$

$$1/u = 40 \text{ de donde se despeja } u = 1/40 = 0,025$$

- De la curva abatimiento vs tiempo

$$s = 0,5 \text{ m}$$

$$t = 0,06 \text{ d}$$

El caudal con el que se trabajó en la prueba de bombeo es de  $6,51 \text{ l/s} = 562,46 \text{ m}^3/\text{d}$

La distancia entre el pozo de producción y el pozo de observación (r) es 26,4 m

El espesor saturado del acuífero (b) es 67 m

Entonces se aplica la fórmula de walton

#### **TRANSMISIVIDAD (T)**

$$T = \frac{Q}{4 * \pi * s} * W(u; \frac{r}{l})$$

$$T = \frac{562,46}{4 * \pi * 0,5} * 3$$

$$T = 268,55 \text{ m}^2/\text{d}$$

De donde se compara el resultado obtenido con la siguiente tabla

*Tabla 4 Clasificación De Acuífero En Funcion De Transmisividad.*

T (m <sup>2</sup> /d)	Calificación estimada
T < 10	Muy baja
10 < T < 100	Baja
100 < T < 500	Media
500 < T < 1000	Alta
T > 1000	Muy alta

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018*

Cae dentro del rango entre 100 y 500 m<sup>2</sup>/d siendo una clasificación de acuífero semiconfinado de media capacidad de transmitir agua a través de su espesor saturado.

**COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)**

$$S = \frac{4 * u * T * t}{r^2}$$

$$S = \frac{4 * 0,025 * 268,55 * 0,06}{26,4^2}$$

$$S = 2,31 \times 10^{-3}$$

*Tabla 5 Valores Típicos De Coeficiente De Almacenamiento.*

Material del acuífero	Funcionamiento del acuífero	Valor de S
Acuíferos kársticos Calizas Dolomías	Libre	0,02 – 0,06
	Semiconfinado	10 <sup>-3</sup> – 5*10 <sup>-4</sup>
	Confinado	10 <sup>-4</sup> – 5*10 <sup>-5</sup>
Acuíferos porosos intergranulares Gravas Arenas	Libre	0,05 – 0,15
	Semiconfinado	10 <sup>-3</sup>
	Confinado	10 <sup>-4</sup>
Acuíferos kársticos y porosos Calcarenitas	Libre	0,15 – 0,18

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018*

El material del acuífero de acuerdo a la litología del pozo es de material poroso intergranular, el valor que se obtuvo se admite ya que está dentro del valor esperado de S tratándose un acuífero semiconfinado.

**RADIO DE INFLUENCIA (R<sub>2</sub>)**

$$(s_1 - s_2) * \left(1 - \frac{s_1 - s_2}{2 * b}\right) = -\frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

Se despeja  $R_2$

$$R_2 = e^{\frac{6,28*s_1*(1-\frac{s_1}{2*b})*T}{Q} + \ln(R_1)}$$

$$R_2 = e^{\frac{6,28*0,5*(1-\frac{0,5}{2*67})*268,55}{562,46} + \ln(26.4)}$$

$$R_2 = 117,56 \text{ m}$$

### PERMEABILIDAD HIDRÁULICA

$$K = \frac{T}{b}$$

$$K = \frac{268,55}{67}$$

$$K = 4,008 \text{ m/d}$$

Tabla 6 Relación Entre El Diámetro Del Pozo Y El Caudal De Bombeo.

K (m/d)	Calificación	Comportamiento
$K < 10^2$	Muy baja	Impermeables
$10^2 < K < 1$	Baja	Acuíferos pobres
$1 < K < 10$	Media	Buenos acuíferos
$10 < K < 100$	Alta	
$K > 100$	Muy alta	

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018

Clasificado como un acuífero de capacidad media de tipo de comportamiento de un buen acuífero.

## 4.2. POZOS MORROS BLANCOS

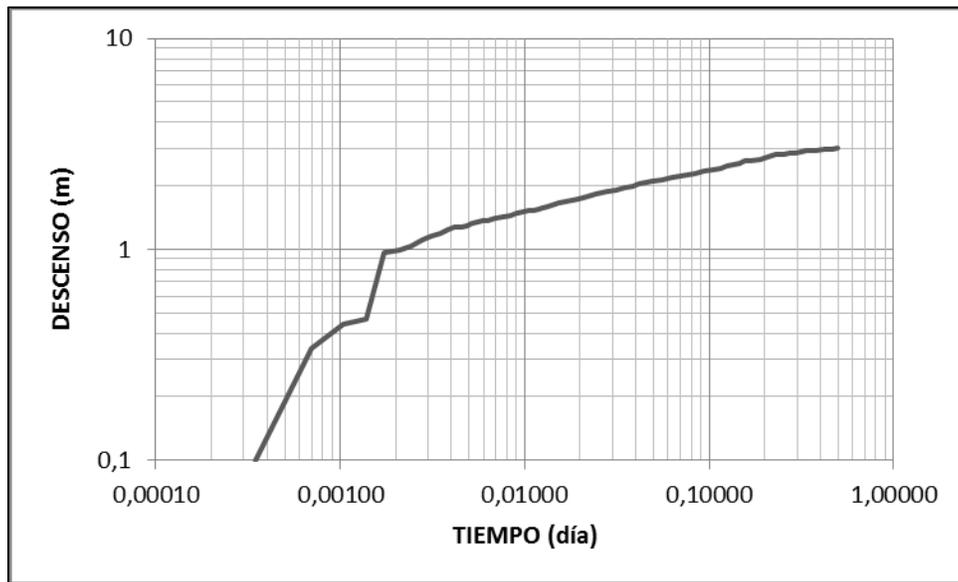


Figura 17: Curva abatimiento vs tiempo del pozo MORROS BLANCOS

Fuente: Elaboración propia

Se realizara la clasificación del acuífero en función a la gráfica obtenida de la prueba de bombeo.

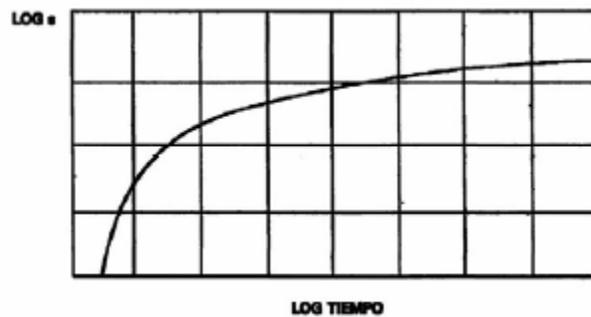


Figura 18: Curva típica de abatimiento (m)-tiempo (min) para acuífero confinado.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2017

Asemejando la curva descenso vs tiempo del pozo morros blancos a la curva característica se acepta que el acuífero se trata de un acuífero confinado, se procede a determinar el método a usar para el cálculo de los parámetros hidrogeológicos y radios de influencia.

Mediante el tipo de ensayo a caudal constante en régimen variable y un acuífero confinado se opta por usar el método de Cooper y Jacop.

#### 4.2.1. MÉTODO DE COOPER JACOP.

Resolución

Se grafica en una hoja semi-logarítmica los valores de descenso vs tiempo (min)

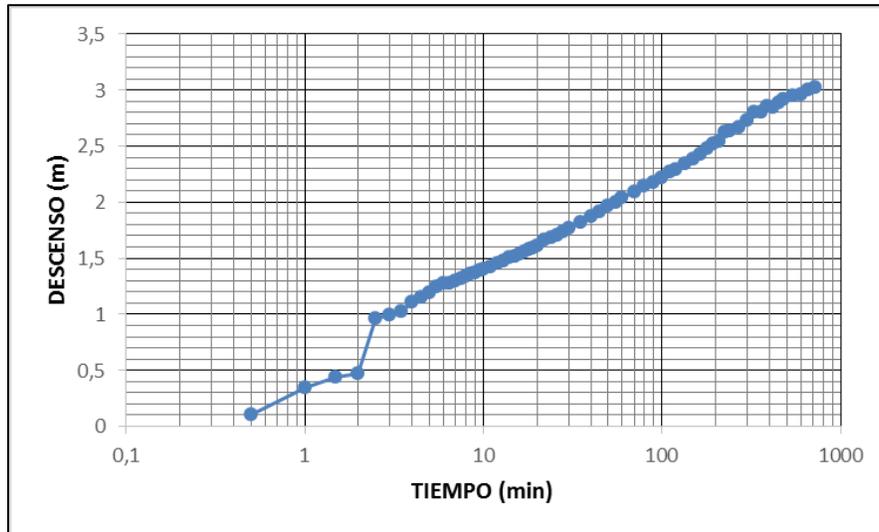


Figura 19: Curva abatimiento vs tiempo en papel semilogarítmico.

Fuente: Elaboración propia

Dibujar una línea que intercepte la mayor cantidad de puntos y prolongarla hasta que choque con el eje de las abscisas.

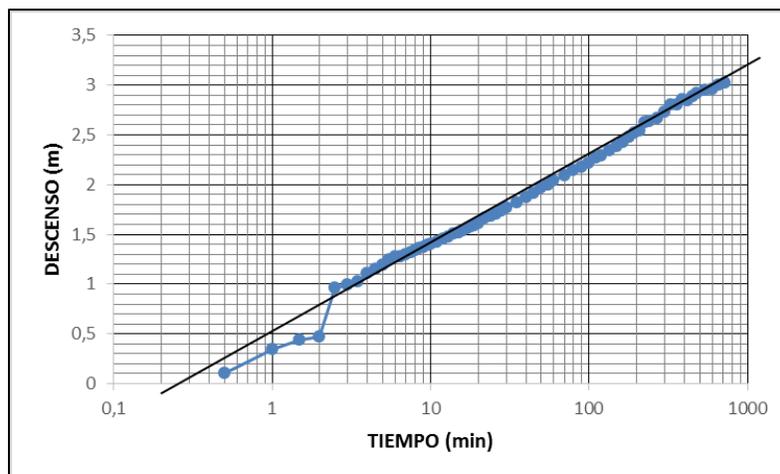


Figura 20: Curva abatimiento vs tiempo en papel semilogarítmico y línea de superposición

Fuente: Elaboración propia

Se determina la pendiente de la recta, esto se realiza tomando un ciclo logarítmico con la diferencia de descensos, también se obtiene el valor de  $t_0$  de la gráfica.

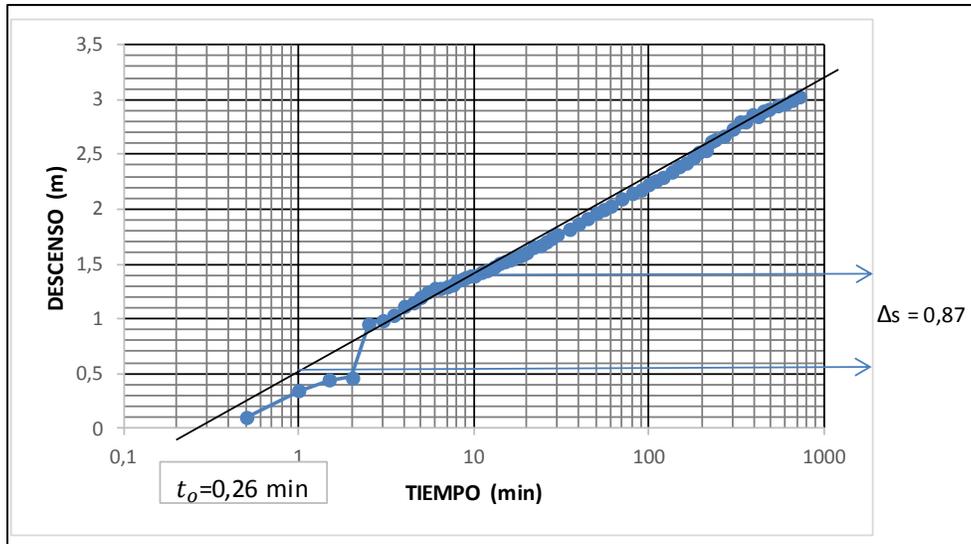


Figura 21: Obtención de datos de la gráfica

Fuente: Elaboración propia

El valor de  $\Delta s$  se obtiene:

$$\Delta s = 1,4 - 0,53 = 0,87 \text{ m}$$

El valor de  $t_0$  se obtiene mediante al interceptar la recta con el eje de las abscisas, donde  $t_0 = 0,26 \text{ min} = 0,000181 \text{ d}$ .

El caudal con el que se trabajó en la prueba de bombeo es de  $11,28 \text{ l/s} = 974,59 \text{ m}^3/\text{d}$

La distancia entre el pozo de producción y el pozo de observación ( $r$ ) es  $38,0 \text{ m}$

El espesor saturado del acuífero ( $b$ ) es  $35 \text{ m}$

Entonces se aplica la fórmula de Cooper y Jacop

### TRANSMISIVIDAD

$$T = \frac{2,30 Q}{4\pi\Delta s}$$

$$T = \frac{2,30 \cdot 974,59}{4 * \pi * 0,87}$$

$$T = 205,03 \text{ m}^2/\text{d}$$

De donde se compara el resultado obtenido con la siguiente tabla

*Tabla 7 Clasificación De Acuífero En Funcion De Transmisividad.*

T (m <sup>2</sup> /d)	Calificación estimada
T < 10	Muy baja
10 < T < 100	Baja
100 < T < 500	Media
500 < T < 1000	Alta
T > 1000	Muy alta

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018*

Cae dentro del rango entre 100 y 500 m<sup>2</sup>/d siendo una clasificación de acuífero confinado de media capacidad de transmitir agua a través de su espesor saturado.

### **COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO S**

$$S = \frac{2,25 T to}{ro^2}$$

$$S = \frac{2,25 * 205,03 * \frac{0,26}{1440}}{38^2}$$

$$S = 5,77 \times 10^{-5}$$

Tabla 8 Valores Típicos De Coeficiente De Almacenamiento.

Material del acuífero	Funcionamiento del acuífero	Valor de S
Acuíferos kársticos Calizas Dolomías	Libre	0,02 – 0,06
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
Acuíferos porosos intergranulares Gravas Arenas	Libre	0,05 – 0,15
	Semiconfinado	$10^{-3}$
	Confinado	$10^{-4}$
Acuíferos kársticos y porosos Calcarenitas	Libre	0,15 – 0,18

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018

El material del acuífero de acuerdo a la litología del pozo es de material poroso intergranular, el valor que se obtuvo se admite ya que está dentro del valor esperado de S tratándose un acuífero confinado.

### RADIOS DE INFLUENCIA $R_2$

$$s_1 = \frac{Q}{2 * \pi * T} * \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

Se despeja  $R_2$

$$R_2 = e^{\frac{6,28 * s_1 * T}{Q} + \ln(R_1)}$$

$$R_2 = e^{\frac{6,28 * 0,87 * 205,03}{974,59} + \ln(38)}$$

$$R_2 = 119,94 \text{ m}$$

## PERMEABILIDAD HIDRÁULICA

$$K = \frac{T}{b}$$

$$K = \frac{205,03}{35}$$

$$K = 5,86 \text{ m/d}$$

Tabla 9 Relación Entre El Diámetro Del Pozo Y El Caudal De Bombeo.

K (m/d)	Calificación	Comportamiento
$K < 10^2$	Muy baja	Impermeables
$10^2 < K < 1$	Baja	Acuíferos pobres
$1 < K < 10$	Media	Buenos acuíferos
$10 < K < 100$	Alta	
$K > 100$	Muy alta	

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018

Clasificado como un acuífero de capacidad media de tipo de comportamiento de un buen acuífero.

### 4.3. VILLA FÁTIMA

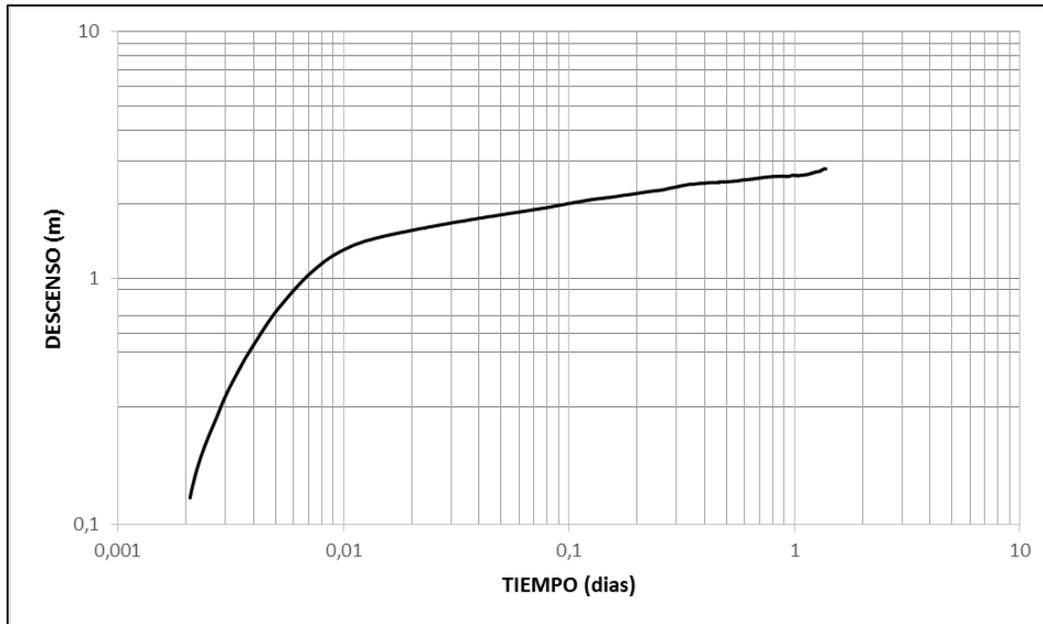


Figura 22: Curvas abatimiento vs tiempo del pozo Villa Fátima

Fuente: Elaboración propia

Primero se realizara la clasificación del acuífero en función a la gráfica obtenida de la prueba de bombeo.

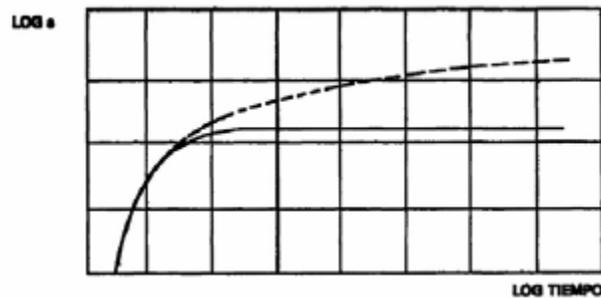


Figura 23: Curva típica de abatimiento (m)-tiempo (min) para acuífero semi-confinado.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2017

Asemejando la curva descenso vs tiempo del pozo VILLA FÁTIMA a la curva característica se acepta que el acuífero se trata de un acuífero semiconfinado, se procede a determinar el método a usar para el cálculo de los parámetros hidrogeológicos y radios de influencia.

Mediante el tipo de ensayo a caudal constante en régimen variable y un acuífero semiconfinado se opta por usar el método de Walton.

### 4.3.1. MÉTODO DE WALTON.

Resolución

Se tiene las curvas tipo de walton

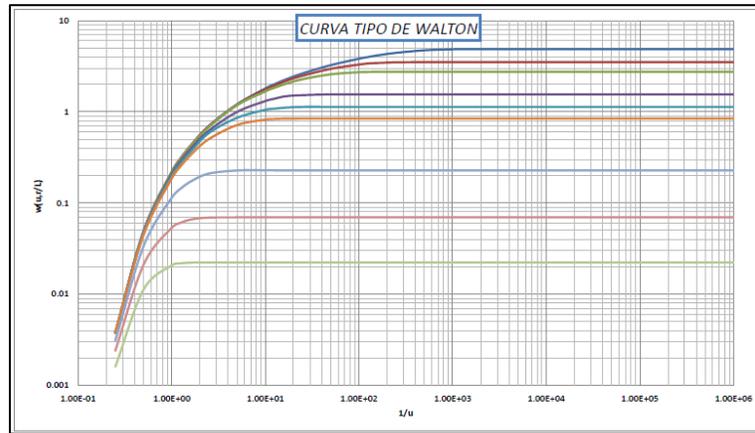


Figura 24: Familia de Curvas Tipo del Método de Walton.

Fuente: Lozada, 2016

Se debe sobreponer la curva descenso vs tiempo con la curva tipo de walton procurando que los ejes sean paralelos y de la misma escala

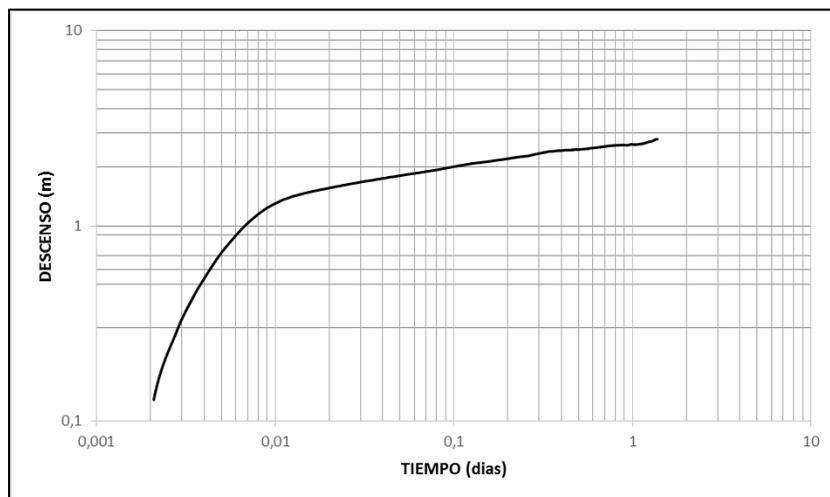


Figura 25: Curva abatimiento vs tiempo del pozo VILLA FÁTIMA

Fuente: Elaboración propia

## Superposición

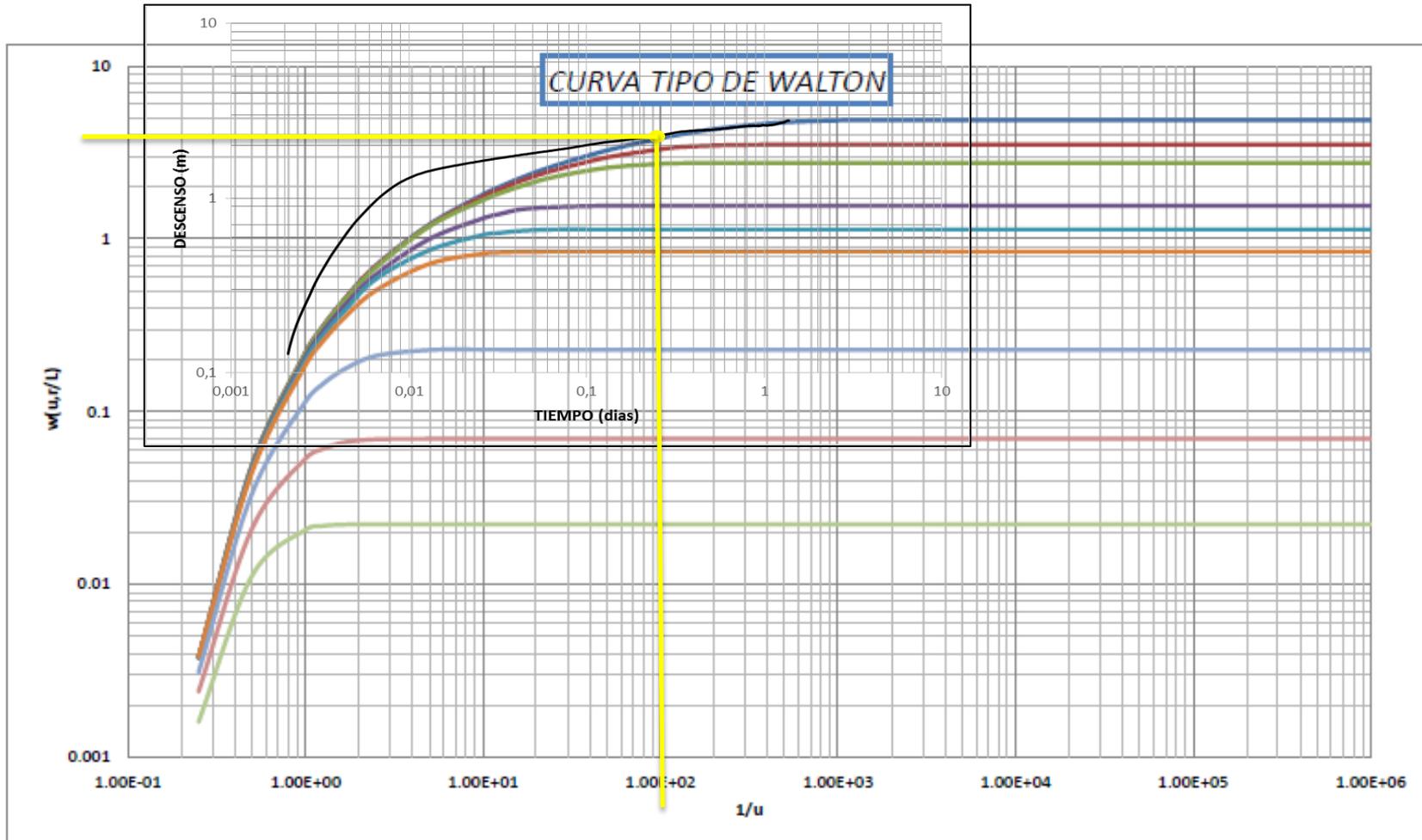


Figura 26: Superposición de curvas.

Fuente: Elaboración propia

De la superposición de curvas se obtiene los siguientes datos:

- De la curva tipo de walton

$$W(u;r/l) = 3,7$$

$$1/u = 100 \text{ de donde se despeja } u = 1/100 = 0,01$$

- De la curva abatimiento vs tiempo

$$s = 2,3 \text{ m}$$

$$t = 0,3 \text{ dí}$$

El caudal con el que se trabajó en la prueba de bombeo es de  $10,92 \text{ l/s} = 943,488 \text{ m}^3/\text{d}$

La distancia entre el pozo de producción y el pozo de observación (r) es 11,1 m

El espesor saturado del acuífero (b) es 50 m

Entonces se aplica la fórmula de walton

### TRANSMISIVIDAD (T)

$$T = \frac{Q}{4 * \pi * s} * W(u; \frac{r}{l})$$

$$T = \frac{943,488}{4 * \pi * 2,3} * 3,7$$

$$T = 120,78 \text{ m}^2/\text{d}$$

De donde se compara el resultado obtenido con la siguiente tabla

*Tabla 10 Clasificación De Acuífero En Funcion De Transmisividad.*

T (m <sup>2</sup> /d)	Calificación estimada
T < 10	Muy baja
10 < T < 100	Baja
100 < T < 500	Media
500 < T < 1000	Alta
T > 1000	Muy alta

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018*

Cae dentro del rango entre 100 y 500 m<sup>2</sup>/d siendo una clasificación de acuífero semiconfinado de media capacidad de transmitir agua a través de su espesor saturado.

### COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)

$$S = \frac{4 * u * T * t}{r^2}$$

$$S = \frac{4 * 0,01 * 120,78 * 0,3}{11,1^2}$$

$$S = 11,76 \times 10^{-3}$$

*Tabla 11 Valores Típicos De Coeficiente De Almacenamiento.*

Material del acuífero	Funcionamiento del acuífero	Valor de S
Acuíferos kársticos Calizas Dolomías	Libre	0,02 – 0,06
	Semiconfinado	10 <sup>-3</sup> – 5*10 <sup>-4</sup>
	Confinado	10 <sup>-4</sup> – 5*10 <sup>-5</sup>
Acuíferos porosos intergranulares Gravas Arenas	Libre	0,05 – 0,15
	Semiconfinado	10 <sup>-3</sup>
	Confinado	10 <sup>-4</sup>
Acuíferos kársticos y porosos Calcarenitas	Libre	0,15 – 0,18

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018*

El material del acuífero de acuerdo a la litología del pozo es de material poroso intergranular, el valor que se obtuvo se admite ya que está dentro del valor esperado de S tratándose un acuífero semiconfinado.

## RADIO DE INFLUENCIA (R<sub>2</sub>)

$$(s_1 - s_2) * \left(1 - \frac{s_1 - s_2}{2 * b}\right) = -\frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$$

Se despeja R<sub>2</sub>

$$R_2 = e^{\frac{6,28 * s_1 * \left(1 - \frac{s_1}{2 * b}\right) * T}{Q} + \ln(R_1)}$$

$$R_2 = e^{\frac{6,28 * 2,3 * \left(1 - \frac{2,3}{2 * 50}\right) * 120,78}{943,488} + \ln(11,1)}$$

$$R_2 = 67,59 \text{ m}$$

## PERMEABILIDAD HIDRÁULICA

$$K = \frac{T}{b}$$

$$K = \frac{120,78}{50}$$

$$K = 2,42 \text{ m/d}$$

Tabla 12 Relación Entre El Diámetro Del Pozo Y El Caudal De Bombeo.

K (m/d)	Calificación	Comportamiento
$K < 10^2$	Muy baja	Impermeables
$10^2 < K < 1$	Baja	Acuíferos pobres
$1 < K < 10$	Media	Buenos acuíferos
$10 < K < 100$	Alta	
$K > 100$	Muy alta	

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018

Clasificado como un acuífero de capacidad media de tipo de comportamiento de un buen acuífero.

Tabla 13 Tabla De Resultados.

PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS E HIDRÁULICOS	POZO DE STADIUM	POZO DE MORROS BLANCOS	POZO DE VILLA FÁTIMA
TRANSMISIBILIDAD (m <sup>2</sup> /d)	268,55	205,03	120,78
COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO	2,31x10 <sup>-3</sup>	5,77x10 <sup>-5</sup>	11,76x10 <sup>-3</sup>
RADIO HIDRÁULICO (m)	117,56	119,94	67,59
PERMEABILIDAD HIDRÁULICA (m/d)	4,008	5,86	2,42

Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO V**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES**

Los resultados de los parámetros hidrogeológicos obtenidos de las pruebas de bombeo están basados a métodos de los cuales tienen ciertos criterios y de acuerdo al tipo de acuífero, del ensayo de bombeo para su aplicación. Los métodos usados para el cálculo de transmisividad o transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento de los pozos STADIUM, MORROS BLANCOS y VILLA FÁTIMA son los que más se ajustaban a los criterios que brindaban.

De las pruebas de bombeo del pozo STADIUM se dio una clasificación al acuífero como semiconfinado de capacidad media para transmitir agua a través de su espesor de capa saturada del acuífero. El comportamiento de este es el de un buen acuífero. Para los cálculos de los parámetros hidrogeológicos se usó el método de WALTON.

De las pruebas de bombeo del pozo MORROS BLANCOS se dio una clasificación al acuífero como confinado de capacidad media para transmitir agua a través de su espesor de capa saturada del acuífero. El comportamiento de este es el de un buen acuífero. Para los cálculos de los parámetros hidrogeológicos se usó el método de COOPER y JACOP

De las pruebas de bombeo del pozo VILLA FÁTIMA se dio una clasificación al acuífero como semiconfinado de capacidad media para transmitir agua a través de su espesor de capa saturada del acuífero. El comportamiento de este es el de un buen acuífero. Para los cálculos de los parámetros hidrogeológicos se usó el método de WALTON.

Para poder determinar la transmisividad, coeficiente de almacenamiento y permeabilidad se podrían determinar mediante el bombeo de un solo pozo sin tener un segundo pozo de observación, pero solo serían valores aproximados, esto podría usarse para pozos en los que no se cuente con pozos cercanos para usarlos como piezómetros. Pero para calcular el radio de influencia se necesitaría si o si el pozo piezométrico.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Para determinar si es viable realizar la prueba de bombeo entre dos pozos o más, se debe primero revisar la información litológica de los mismo, verificar si los niveles de filtros y espesores de la capa saturada del acuífero coinciden en gran parte.
- Se recomienda verificar si existe interconexión hidráulica entre pozos, mediante el bombeo de uno de los pozos de esta prueba y verificando si existe descenso de nivel de agua en los demás pozos mientras se encuentran en reposo.
- Para que las curvas abatimiento vs tiempo se puedan apreciar mucho mejor se recomienda tomar la mayor cantidad de datos de niveles piezométricos que sea posible, si existe recursos económicos necesarios para comprar equipos de medición automática de niveles piezómetros de agua y de aforo de caudales alivianaría el trabajo de la prueba de bombeo.
- Para aprovechar la prueba de bombeo se debe tomar muestras de la calidad del agua para controlar los parámetros de ésta y así poder tener datos para posteriores investigaciones.
- Al realizar la superposición de curvas tanto las curvas tipo del método de Walton y la curva abatimiento vs tiempo se recomienda que los ejes de las curvas estén a las mismas escalas, para una mejor exactitud al realizar la toma de datos de las curvas.
- Cuando se realiza la superposición de las curvas se debe procurar en mantener los ejes de ambas curvas paralelos.
- Debería crearse una norma que regule la construcción de pozos de agua subterránea y la explotación de estos, ya que por ahora solo se cuenta con un resolución para las empresas prestadoras de servicios de agua potable y alcantarillado sanitario para que estas regulen la explotación de los pozos de su zona de concesión.
- Se recomienda que en la Norma Boliviana NB-689 se pueda incluir un apartado especialmente para sistemas de agua potable subterráneas, ya que es el máximo órgano rector para dar cumplimiento a la construcción y explotación de pozos de agua potable, caso contrario convendría ampliarse el capítulo de aguas subterráneas.