

# **CAPÍTULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

En la última década, el agua subterránea se convirtió en un recurso natural de vital importancia a nivel mundial, siendo esta la fuente principal para el consumo humano, por lo que surge, la necesidad de realizar estudios hidrogeológicos que permitan obtener información suficiente para elaborar un plan estratégico en la gestión del agua subterránea, la importancia de estos estudios es tal, que en muchos países son un requisito fundamental para la ejecución de cualquier proyecto relacionado con las aguas subterráneas.

En nuestro país, existen pocas investigaciones que se dediquen al estudio de las aguas subterráneas, desde investigaciones destinadas a conocer el comportamiento de los acuíferos, cuantificación de reservas explotables, problemas sobre explotación, problemas de contaminación, entre otros enfoques que conducen a la conservación y explotación racional de estos recursos, así mismo, no se aplican políticas para la protección y preservación de dicho elemento, por el cual existe un uso indiscriminado de este recurso.

Actualmente, la EPSA encargada del abastecimiento de agua potable en la ciudad de Tarija es la Cooperativa de Servicio de Agua y Alcantarillado de Tarija (COSAALT R.L.), la cual tiene como principal fuente de abastecimiento de agua potable, las aguas superficiales del Río La Victoria, pero debido a la disminución de estas aguas y al crecimiento desmedido de la población en los últimos años, se está recurriendo a la explotación del recurso subterráneo mediante perforaciones de pozos profundos que van en incremento con el pasar de los años.

El presente trabajo de investigación busca generar información muy importante, como ser la transmisividad y la conductividad hidráulica, parámetros hidrogeológicos que servirán para posteriores investigaciones, a

su vez generar mapas piezométricos utilizando información de niveles proporcionados por COSAALT R.L., medidos en diferentes campañas.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Ante la necesidad que tiene la cooperativa de servicios de agua y alcantarillado de Tarija (COSAALT R.L.), de contar con información necesaria para realizar un seguimiento y control de las aguas subterráneas, en cada uno de los pozos que están bajo su concesión, resulta de mucha importancia conocer las superficies piezométricas o mapas de isopiezas, ya que estos mapas permiten analizar la variabilidad espacio-temporal piezométrica permitiendo caracterizar modificaciones temporales y espaciales del nivel piezométrico, también nos permiten ver la dirección de flujo de gran interés para la administración del recurso.

Así mismo es importante conocer los parámetros hidrogeológicos característicos del acuífero en cada pozo, parámetros que serán utilizados en proyectos de investigación a futuro, que permitan ver el comportamiento hidráulico del acuífero, como también en estudios a futuro relacionados en la protección y preservación de las aguas subterráneas.

El presente trabajo de investigación, surge de la necesidad de estudiar los niveles piezométricos y conocer los parámetros hidrogeológicos característicos de los pozos subterráneos que están en el área de concesión de COSAALT R.L., con el propósito de obtener información importante, como ser: niveles piezométricos, transmisividad, permeabilidad o conductividad hidráulica y en algunos casos el coeficiente de almacenamiento. Para lo cual, se va realizar un análisis de los niveles estáticos monitoreados por COSAALT R.L., convertirlo a nivel piezométrico y plasmar estos niveles en un mapa piezométrico para un posterior análisis. Para determinar los parámetros hidrogeológicos se realizará ensayos de bombeo en recuperación aplicados al mismo pozo de bombeo, aplicando una metodología de cálculo de la transmisividad para cada tipo de acuífero mediante ensayos de recuperación.

El presente trabajo de investigación busca proporcionar información que será de gran utilidad para COSAALT R.L., lo cual, le permitirá conocer de mejor manera el comportamiento hidráulico del agua subterránea, a su vez permitirá conocer las características hidráulicas del acuífero del valle central, información que servirá como base para elaborar planes de protección y preservación del agua, mejorando el servicio para la población de la ciudad de Tarija.

Debido a que no se cuenta con información suficiente, ni muchos estudios relacionados con el agua subterránea a nivel local, el presente trabajo de investigación es conveniente para enriquecer un mayor conocimiento sobre el comportamiento y sus características de cada pozo subterráneo que están en el área de concesión de COSAALT R.L.

Por otra parte, la investigación contribuye a ampliar la información que se tiene sobre los pozos de COSAALT R.L., ya que podrían realizarse futuras investigaciones relacionados al agua subterránea utilizando esta información y a su vez ampliar el conocimiento de técnicas y metodologías aplicables al estudio de las aguas subterráneas.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### ***1.3.1. Antecedentes del problema***

El agua subterránea y los terrenos que la contienen y la pueden ceder, se constituyen en importantes reservas de agua dulce con una menor susceptibilidad a los efectos de la contaminación y degradación, en comparación con las fuentes superficiales de agua. De ahí la importancia de conocer su ocurrencia, distribución y principales características para una gestión adecuada y sostenible del recurso. (Mejía Ramírez & Ramírez Güina, 2016).

En los últimos años, la ciudad de Tarija ha tenido un importante crecimiento de su población, la demanda del recurso hídrico subterráneo ha aumentado considerablemente, esto se ve reflejado en la cantidad de pozos

perforados que están bajo la concesión de COSAALT R.L., pozos que en la actualidad no cuentan con información hidrogeológica necesaria para su monitoreo, como ser la transmisividad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, entre otros, parámetros que permiten conocer la eficiencia de bombeo de cada pozo y el caudal de explotación óptimo que soporta el acuífero.

### **1.3.2. Planteamiento del problema**

Como se mencionó anteriormente, uno de los principales problemas que tiene la cooperativa de servicios de agua y alcantarillado de Tarija (COSAALT R.L.), es que no cuenta con la información necesaria para planificar el aprovechamiento sostenible del recurso hídrico subterráneo, debido a que la información histórica es escasa y la existente en algunos casos es limitada, por tal razón existen pocos estudios relacionados al agua subterránea.

Sin embargo, el conocimiento y control del recurso hídrico subterráneo, mediante redes de monitoreo y campañas periódicas de toma de información no es tarea fácil. La principal dificultad radica en que este sistema hídrico subterráneo, a diferencia del superficial, está oculto al investigador y sus comportamientos y cambios ocurren muy lentamente debajo de la tierra y en grandes extensiones (Tuinhof & Foster, 2002-2006).

Por tanto, para que COSAALT R.L. pueda realizar una gestión adecuada y sostenible del recurso subterráneo, es necesaria, la recopilación y obtención de parámetros hidrogeológicos, que sirvan como información base, en la elaboración de modelos conceptuales, teóricos y matemáticos que definen las diferentes unidades hidrogeológicas del acuífero y la capacidad de cada una para almacenar y transmitir agua.

### **1.3.3. Pregunta de investigación**

¿Cuáles son los niveles piezométricos y cuáles son los parámetros hidrogeológicos de los pozos subterráneos que están en el área de concesión de COSAALT R.L.?

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Elaborar mapas piezométricos y calcular parámetros hidrogeológicos de los pozos subterráneos que están en el área de concesión de COSAALT R.L. mediante ensayos de recuperación aplicados al mismo pozo de bombeo.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Analizar las direcciones de flujo de las aguas subterráneas en el área de estudio.
- Realizar pruebas de bombeo y de recuperación en el mismo pozo de bombeo.
- Clasificar el tipo de acuífero donde se encuentra perforado cada pozo.
- Calcular la transmisividad aplicando métodos de ensayos de recuperación.
- Calcular la Conductividad hidráulica conociendo el espesor de acuífero.

## **1.5. HIPÓTESIS**

Los mapas piezométricos ayudarán a conocer las variaciones temporales del agua subterránea con respecto al tiempo y espacio, y los parámetros hidrogeológicos permitirán realizar una planificación adecuada, para la explotación racional y eficiente de los pozos subterráneos.

## **1.6. LIMITACIONES DEL ESTUDIO**

Como se mencionó anterior mente, la EPSA encargada del abastecimiento de agua potable en la ciudad de Tarija es COSAALT R.L., para cumplir con este propósito tiene bajo su concesión varios pozos subterráneos, que en su mayoría entran en operación en época de estiaje, en algunos casos los pozos operan todos los días continuamente las 24 horas todo el año y los demás pozos trabajan automáticamente con horarios fijos de encendido y apagado. Es por esta razón que los ensayos de bombeo se ajustaron a los

horarios de provisión de agua potable establecidos por COSAALT R.L., con colaboración de ellos, sin que implicara alterar sustancialmente el servicio de suministro de agua potable a los barrios.

Para la elaboración de mapas piezométricos se requieren información de niveles estáticos, coordenadas y cotas de elevación de cada pozo, pero no todos los pozos cuentan con información de niveles estáticos debido a la imposibilidad de medirlos, esto, porque algunos pozos no cuentan con tubería de  $\frac{3}{4}$  pulgadas para introducir el zonda o esta tubería se encuentra trancada, o en algunos casos por el funcionamiento continuo del pozo.

Todos los pozos cuentan con coordenadas y cotas, pero se comprobó que en algunos casos dan la ubicación en otro punto alejado con respecto a la ubicación real del pozo, también no se sabe con exactitud a que sistema de proyección se encuentran estos datos, por el cual se utilizó google earth para obtener esta información.

Para el desarrollo de un ensayo o prueba de bombeo, antes de comenzar el pozo debe estar en reposo mínimamente 24 horas, sin embargo, solo en tres pozos se pudo contar con más de 24 horas de reposo debido a que no se encontraban en funcionamiento, en los demás pozos se tuvo que realizar la prueba con tiempos de reposo de acuerdo al horario de funcionamiento del mismo (ver anexos H). Esto debido a que la bomba debe estar apagada todo ese tiempo, además que la duración de la prueba debe ser por lo mínimo 24 horas, posteriormente se mide la recuperación otras 24 horas, lo que significaría dejar sin dotación de agua potable a los barrios todo ese tiempo, originando los reclamos respectivos hacia COSAALT R.L., debido a que no todos los pozos cuentan con tanque elevado para su almacenamiento, siendo los pozos con bombeo directo hacia el sistema de agua potable.

Debido a las limitaciones mencionadas anteriormente, estas pruebas se ajustaron a los horarios de funcionamiento de cada pozo, es decir, que se aprovechó para realizar las mediciones de recuperación el momento que se

apaga la bomba en el horario programado, de la misma forma se midieron los descensos en el momento de encendido de la bomba a la hora programada (ver anexos H).

Para el caso de los pozos que funcionan 24 horas todo el año, se coordinó con COSAALT y los operadores de cada pozo en ver un horario adecuado para poder apagar la bomba, por lo mínimo 3 horas para medir la recuperación, y luego encenderla para medir los descensos, esto con el fin de no perjudicar el suministro de agua potable a la población y evitar reclamos hacia COSAALT R.L.

Los ensayos o pruebas de bombeo tienen una gran ventaja de poder determinar parámetros hidrogeológicos característicos del acuífero en la zona de influencia del pozo bombeado, parámetros que definen el comportamiento hidrodinámico del flujo subterráneo.

Sin embargo, los métodos analíticos de estos ensayos requieren de ciertas condiciones físicas del acuífero para su aplicación, que no siempre se cumplen o se cumplen en forma aproximada, como ser: acuíferos homogéneos e isótropos, el acuífero es infinito, no existen recargas exteriores, el pozo atraviesa completamente la formación permeable, el flujo del agua hacia el pozo es radial y no tiene componentes verticales, el pozo de bombeo es de diámetro cero, el agua que se bombea produce un inmediato descenso del nivel y no vuelve a introducirse al acuífero, en el caso de acuíferos semiconfinados, que el acuífero superior esté bien alimentado, que el acuífero superior no ceda agua a través del pozo, que el Nivel Estático será el mismo en el acuífero superior y en el inferior, que al deprimir el nivel del acuífero inferior se crea un gradiente hacia el mismo, que obliga al acuífero superior a recargarlo a través de la formación semipermeable. Como también estos métodos requieren de pozos de observación.

Las condiciones mencionadas anteriormente tanto en la duración de la prueba como en la aplicación de los métodos, se cumplieron en forma

aproximada, ya que, en todos los pozos no se cuenta con pozos de observación, tampoco se podía contar con suficiente tiempo para la recuperación o el bombeo antes de la prueba, por la necesidad de mantener los sistemas en operación y no alterar el suministro de agua potable.

En algunas pruebas el caudal se estimó en forma aproximada o se tomó de una base de datos proporcionados por COSAALT, por la imposibilidad de medirlo, debido a que en la mayoría de los pozos los sistemas de desagüe se encontraban clausurados o la llave no servía por lo que fue imposible aforar el caudal.

Durante la prueba de recuperación en algunos pozos, las válvulas de retención no operaron correctamente, teniendo un contraflujo y recargado del acuífero a través del pozo de bombeo.

El registro de niveles en la recuperación y descensos, se efectuó con sonda eléctrica, en algunos casos midiendo fracciones de centímetro lo cual también es otra aproximación.

Otra limitación que se tuvo, es que no se pudo calcular el coeficiente de almacenamiento, debido que para calcular este parámetro hidrogeológico se requiere de por lo menos un pozo de observación.

A pesar de todas estas limitaciones, se estima que se tienen resultados confiables, desechando la información no confiable.

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

Mediante este estudio serán elaborados mapas piezométricos y se determinarán parámetros hidrogeológicos como ser: la transmisividad y conductividad hidráulica de los pozos que están bajo la concesión de COSAALT R.L.

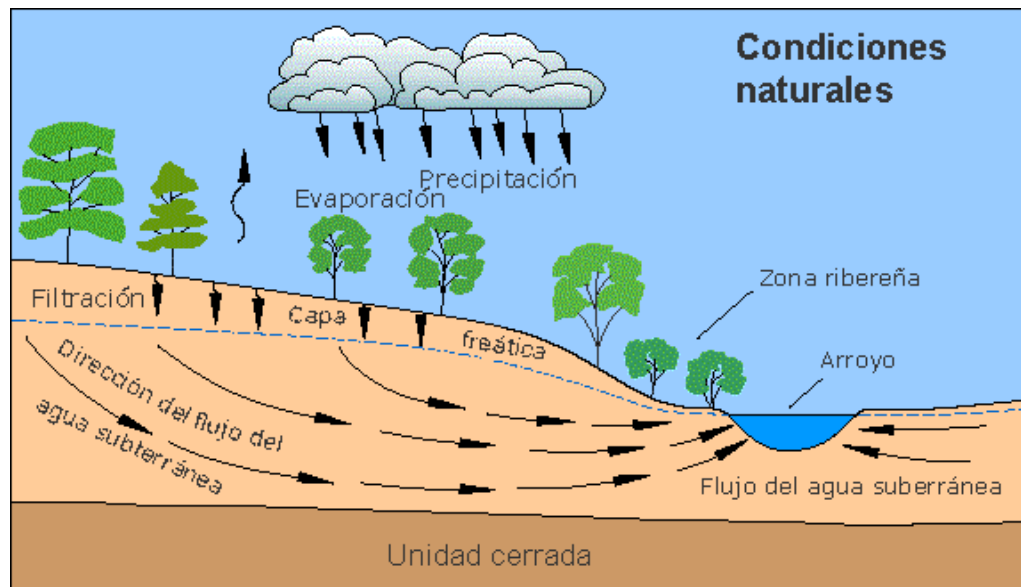


## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1. DEFINICIONES BÁSICAS

#### 2.1.1. Aguas subterráneas

Son aguas que se encuentran bajo tierra, en las grietas y huecos del suelo, tiene su origen en la lluvia que se infiltra en el terreno a través de poros y fisuras. Esta agua percola a grandes profundidades formándose así los acuíferos y puede ser extraída por medio de pozos subterráneos, o se descarga naturalmente a través de manantiales, cauces de superficie, lagos o mares.



**Figura 1** El agua subterránea en condiciones naturales

Fuente: Obtenido de flujo subterráneo, por USGS Science for a changing world, s.f., (<https://water.usgs.gov/gotita/earthgwdecline.html>).

#### 2.1.2. Pozos subterráneos

Un pozo subterráneo, es una obra de captación vertical que permite la explotación del agua freática contenida en los intersticios o las fisuras de una roca del subsuelo, en lo que se denomina acuífero. El agua puede llevarse hasta el nivel del suelo de manera sencilla con ayuda de un recipiente o más fácilmente con una bomba, manual o motorizada.



**Figura 2** Extracción de agua subterránea mediante sistema de bombeo

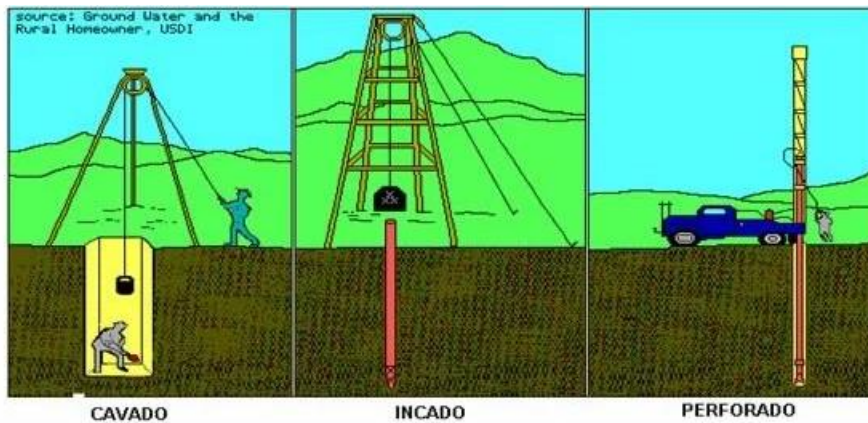
Fuente: Obtenida de Sistemas de agua potable y perforación de pozos mecánicos en arquitectura (p. 44), por González Hernández, O. R., 2015.

Existen varios tipos de pozos como los excavados, hincados o perforados.

**2.1.2.1. Pozos excavados.** - Se efectúan con herramienta sencilla, de una forma artesanal, se encuentra levemente al excavar el nivel freático.

**2.1.2.2. Pozo hincado.** -Se trata de una obra de captación integrada por un tubo perforado con el extremo puntiagudo que se hunde hasta la capa freática de suelos blandos o de dureza media, aplicando diferentes técnicas.

**2.1.2.3. Pozo Perforado.** - Obra hidrogeológica de acceso a uno o más acuíferos para la captación de agua subterránea, ejecutada con sonda perforadora en forma vertical con diámetro mínimo de 8”.

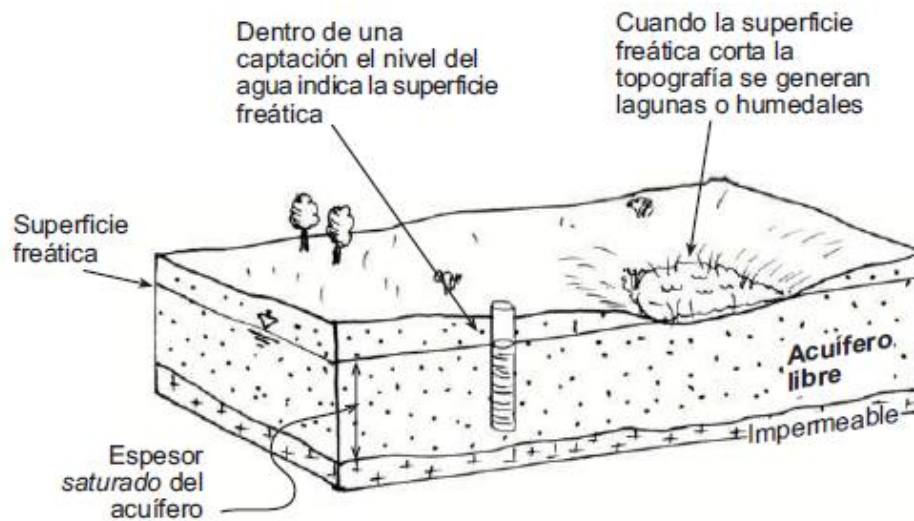


**Figura 3** Tipos de pozos subterráneos para la extracción de agua

Fuente: Obtenida de Aguas subterráneas, por Fibras y Normas de Colombia S.A.S. s.f., (<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/aguas-subterranas-definicion-importancia-formas-de-contaminacion-y-recomendaciones/>). extracción-tipos-de-

### 2.1.3. Acuífero

Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad (Sánchez San Román, 2012).



**Figura 4** Representación esquemática de un acuífero

Fuente: Obtenido de Hidrología e Hidrogeológica (p. 103), por Sánchez San Román, 2012.

Como ejemplo podemos mencionar a las Arenas, gravas, granito u otra roca compacta con una fracturación importante

#### 2.1.4. Tipos de Acuíferos

El tipo de acuífero viene definido por las características de la capa situada sobre él (Tabla 1). Por ello, se puede dar el siguiente esquema para la caracterización del tipo de acuífero (ver también Fig. 5).

**Tabla 1** Características de las capas que definen el tipo de acuífero

CAPA SOBRE EL ACUÍFERO	TIPO DE ACUÍFERO
Impermeable	Confinado
Semi-permeable, por lo que se puede despreciar el flujo horizontal.	Semi-confinado
Menos permeable que la mayor parte del acuífero, pero no se puede despreciar el flujo horizontal.	Semi-Libre
Igual que la mayor parte del acuífero.	Libre (Con rendimiento retardado)

Fuente: Obtenido de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p. 6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

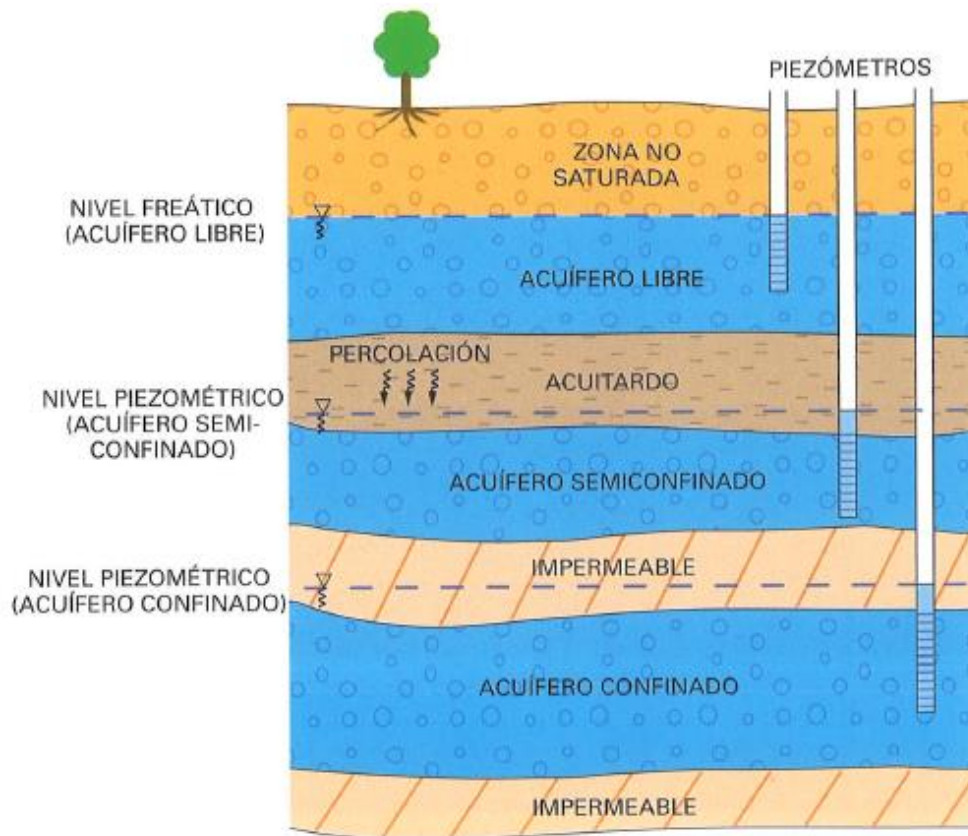
A continuación, se describen los diferentes tipos de acuíferos que generalmente se distinguen cuando se estudian el flujo subterráneo.

**2.1.4.1. Acuíferos libres:** también llamados no confinados o freáticos. Entre ellos existe una superficie libre y real del agua almacenada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático se encuentra la zona no saturada. La superficie hasta donde llega el agua, se denomina superficie freática; cuando esta superficie es cortada por un pozo se habla de nivel freático en ese punto.

**2.1.4.2. Acuíferos confinados:** También llamados cautivos, a presión en carga: en ellos el agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. Si se extrae agua de él, ningún poro se vacía, sólo disminuye la presión del agua. Al disminuir la presión, pueden llegar a producirse asentamientos y subsidencias del terreno. En ellos no existe zona

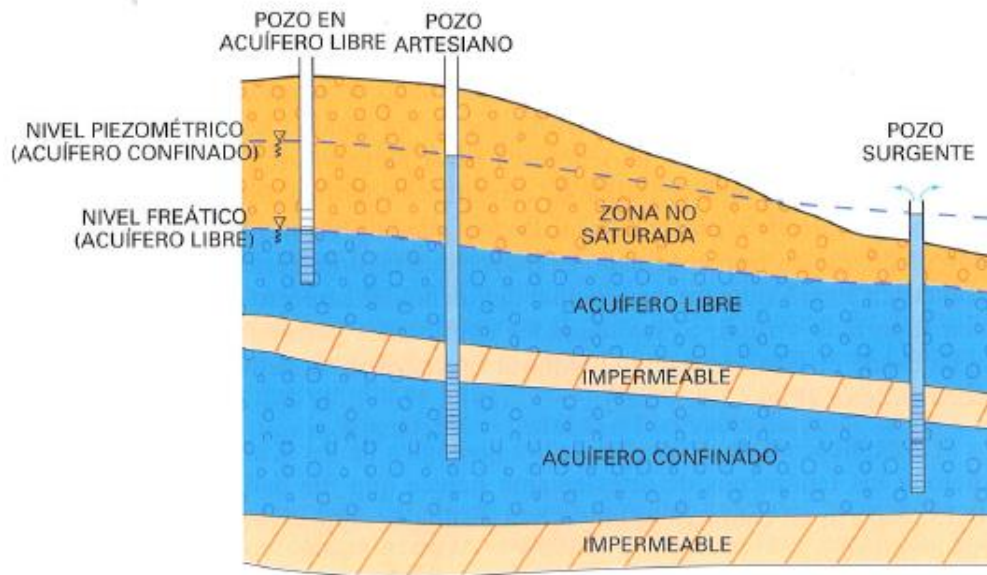
no saturada. En el caso de que se perforase este tipo de acuíferos, el nivel de agua ascendería hasta situarse en una determinada posición que coincide con el nivel de saturación del acuífero en el área de recarga; a este nivel se le conoce con el nombre de nivel piezométrico. Si unimos todos los niveles piezométricos, obtendremos la superficie piezométrica (superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero).

**2.1.4.3. Acuíferos semiconfinados:** Son más frecuentes que los acuíferos confinados, pudiendo afirmar que se trata de acuíferos a presión, pero en algunas de las capas confinantes son semipermeables, Acuitardos.



**Figura 5** Tipos de acuíferos

Fuente: Obtenida de Fundamentos de hidrogeología (p. 78), por Martínez A., Martínez S., & Castaño C., 2006).



**Figura 6** Comportamiento de los distintos tipos de pozos según su potencial hidráulico

Fuente: Obtenida de Fundamentos de Hidrogeología (p. 78), por Martínez A., Martínez S., & Castaño C., 2006).

### **2.1.5. Nivel Freático**

El nivel freático, también conocido como manto freático, capa freática, napa subterránea o tabla de agua es el nivel en donde tanto el suelo como las rocas se encuentran permanentemente saturados, es la línea de división entre la zona de aireación y la zona de saturación de los acuíferos, el nivel freático, puede encontrarse en la superficie formando lagos, ríos, manantiales y pantanos. La profundidad del nivel freático de un acuífero suele variar en función de las precipitaciones estacionales de a la zona, la permeabilidad de las rocas o el caudal de agua extraído por la población tanto para el consumo como para uso agrícola (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2004).

### **2.1.6. Nivel Dinámico**

Es el nivel del agua en el pozo con la bomba en marcha, es decir sacando un caudal determinado (Ver figura 7). Puede ser variable ya que en función del caudal que saque la bomba puede que vaya bajando continuamente hasta llegar el nivel de ésta (pozo seco técnicamente).

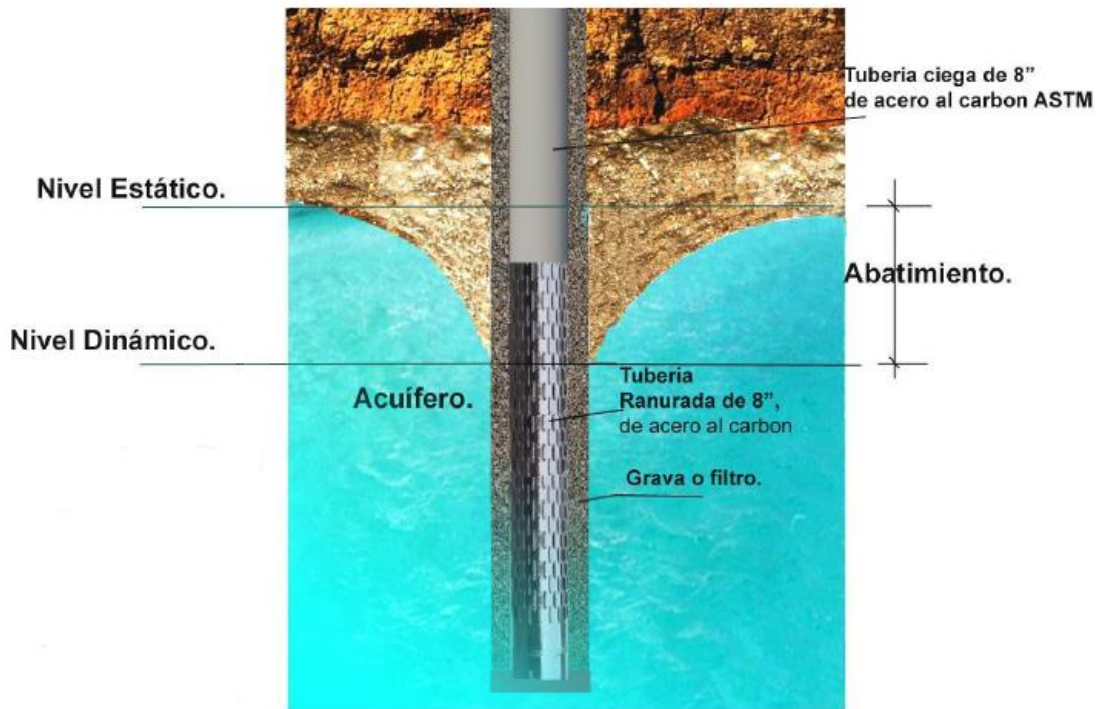


### 2.1.7. Nivel Estático

Es el nivel del agua en el pozo con la bomba apagada y viniendo del reposo (al menos 1 hora sin la bomba en marcha (Ver figura 7). Nos indica el nivel de la capa freática (nivel del agua) en reposo (AgroIntelligent, 2022).

### 2.1.8. Abatimiento

Reducción del nivel de los acuíferos hasta el mínimo aprovechable. Diferencia entre el nivel estático y el nivel dinámico o de bombeo en el pozo de explotación de un acuífero.



**Figura 7** Esquema representativo del Nivel Estático, Nivel Dinámico y Abatimiento

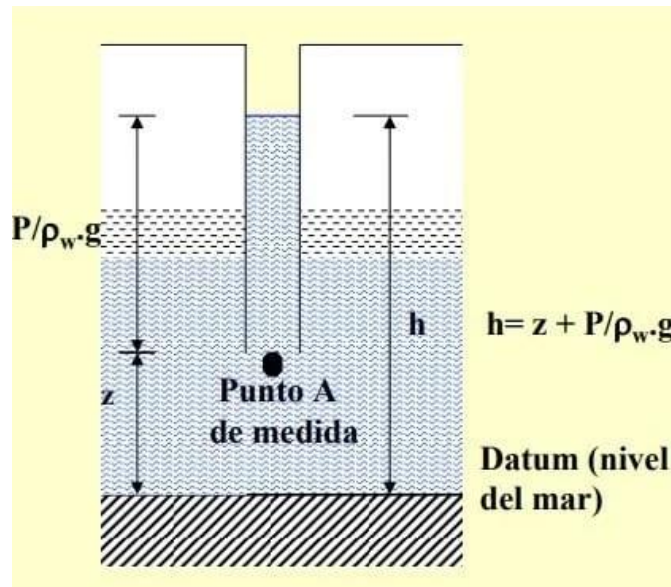
Fuente: Obtenida de Sistemas de agua potable y perforación de pozos mecánicos en arquitectura (p. 79), por González Hernández, O. R., 2015.

### 2.1.9. Nivel Piezométrico

El nivel piezométrico corresponde en los acuíferos libres a la altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar, y en los acuíferos confinados, corresponde a la presión existente y la altura que alcanzaría el agua sobre un punto del acuífero en el cual está se encuentra o un pozo o un sondeo hasta

equilibrarse con la presión atmosférica; Por lo tanto, en cada punto donde exista una perforación de un acuífero confinado se tiene un nivel piezométrico propio y diferente (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2004).

En la figura 8, se describe de forma esquemática la definición de nivel piezométrico.



**Figura 8** Esquematización del concepto de nivel piezométrico

Fuente: Obtenida de nivel freático y nivel piezométrico, por Fibras y Normas de Colombia S.A.S, 2022 (<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/nivel-freatico-y-nivel-piezometrico/>).

Donde:

- $h$  = Es el nivel piezométrico en el punto de medida A (Altura que tendrá la tabla de agua dentro del sondeo desde un punto inicial o datum).
- $z$  = Representa la energía generada por la elevación del punto A sobre el nivel de referencia o datum.
- $P$  = Es la presión que ejerce la columna de agua sobre el punto A.
- $\rho_w$  = Es el valor de la densidad del agua.
- $g$  = Es la constante de la gravedad.
- $P/\rho_w \cdot g$  = Es la fórmula que representa la longitud de la columna de agua dentro del sondeo o la perforación.



## **2.2. MAPA PIEZOMÉTRICO O SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA**

La superficie piezométrica, es una superficie que se proyecta en dos dimensiones (X, Y), y representa la geometría que une los puntos que indican la altura de la tabla de agua en un acuífero a una determinada profundidad en el mismo. Este tipo de superficies son representadas mediante isopiezas (líneas que unen puntos de igual valor del nivel piezométrico), donde el valor de las isopiezas debe ser expresada siempre junto a las mismas y se debe procurar que la separación entre ellas sea equidistante. Las superficies piezométricas tienen como finalidad demostrar la evolución espacial de la profundidad del agua en factores como la superficie del terreno, el valor de los gradientes hidráulicos, la dirección y sentido del flujo de agua subterránea, entre otros (Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2004).

El estudio de las superficies piezométricas permite obtener información básica sobre el movimiento y comportamiento del agua subterránea, como es el caso de la dirección del flujo del agua subterránea, la ubicación de zonas de recarga y descarga del acuífero, la existencia de heterogeneidades hidráulicas tales como cambios de permeabilidad dentro de una misma formación litológica o cambios de acuífero, la existencia de niveles acuíferos libres y confinados superpuestos o adyacentes, la existencia de flujos verticales o laterales entre formaciones distintas, etc.

### ***2.2.1. Trazado e interpretación de superficies piezométricas***

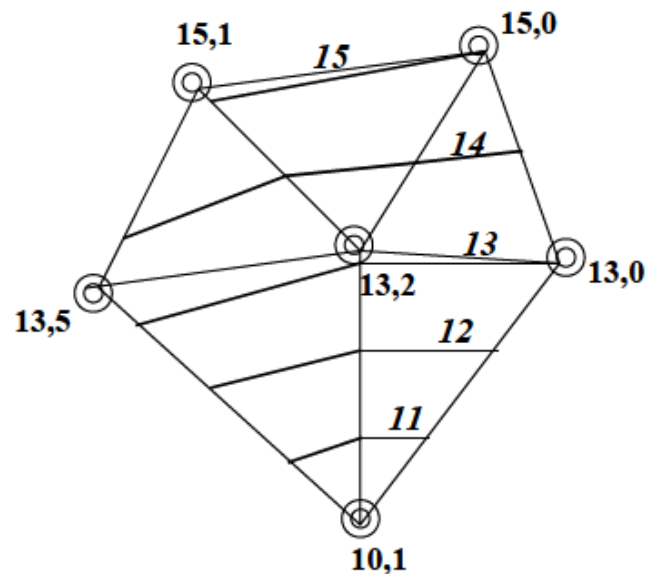
Según Manzano Arellano (2008), sólo es posible obtener valores del nivel piezométrico en un conjunto de puntos discretos de un acuífero (pozos, sondeos, manantiales). A partir de ellos deben trazarse las curvas de nivel (isopiezas) que sirvan para definir la superficie piezométrica.

El trazado de las isopiezas de un acuífero o sector de acuífero requiere, en primer lugar, dos cosas:

- 1) Que los valores de nivel (freático o piezométrico) medidos correspondan a un mismo acuífero.

- 2) Que estén expresados en cotas absolutas (m sobre el nivel del mar), como lo que se mide en los pozos y sondeos es la profundidad del agua desde un punto concreto del terreno o del borde de la entubación, ese punto debe estar correctamente nivelado para poder transformar la profundidad en cota.

Una vez comprobado el requisito 1 y realizada la transformación 2, la determinación del lugar por el cual pasan las isopiezas se realiza mediante interpolación geométrica sobre el mapa (Fig. 9).



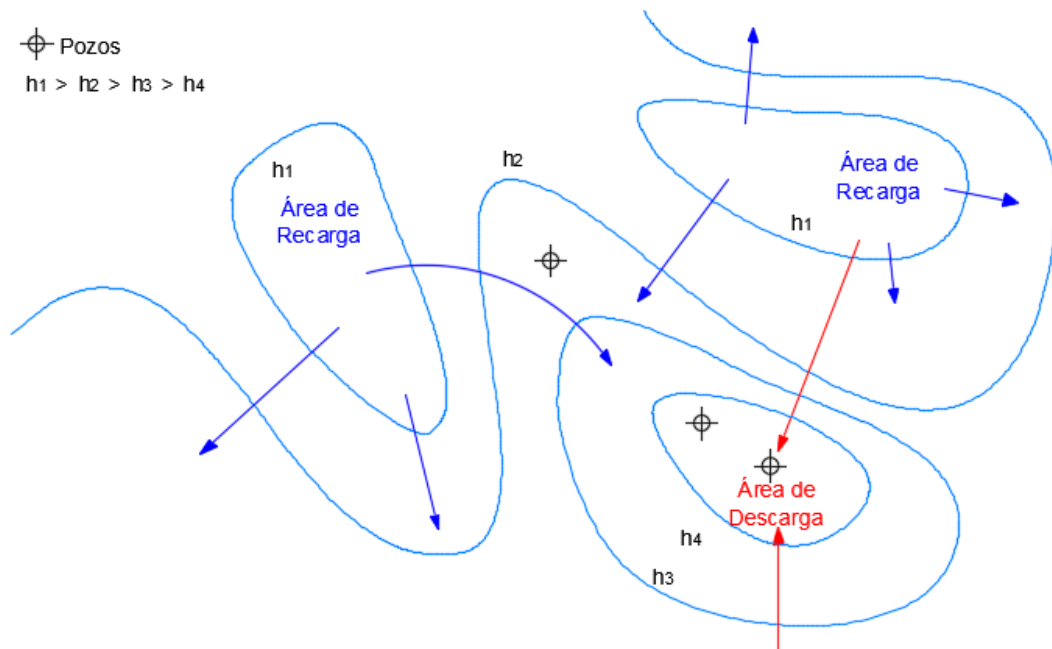
**Figura 9** Trazado de isopiezas mediante interpolación a partir de cinco valores de nivel

Fuente: Obtenido de Trazado e Interpretación de Superficies Piezométricas, por Manzano Arellano, 2008 ([https://www.upct.es/~minaeees/practica2\\_explicacion.pdf](https://www.upct.es/~minaeees/practica2_explicacion.pdf)).

Se supondrá que el medio es homogéneo e isótropo y que el nivel varía gradualmente.

Según Martínez A., Martínez S., & Castaño C., 2006 el trazado de las isopiezas no debe limitarse al uso de un programa informático de trazado de isolineas, sino que también, el trazado requiere tomar en cuenta ciertos criterios hidrogeológicos:

- a) Las áreas de recarga, domos, vendrán representadas por isopiezas cerradas o semicerradas, más o menos concéntricas y con el potencial decreciente desde el interior hacia el exterior. Esto implica un flujo divergente penetrante en el acuífero desde la zona de recarga (fig. 10).
- b) Las áreas de descarga también vendrán definidas por isopiezas cerradas o semicerradas y más o menos concéntricas entre sí, pero el potencial más bajo corresponderá a la isopieza interior. El flujo será convergente hacia el cono invertido que define el área de descarga (pozo, manantial, zona húmeda, ect.). Las zonas húmedas originadas por descarga de agua subterránea tienen el nivel de agua por encima de la cota de terreno, por lo tanto el valor de las isopiezas en esas zonas será superior al de las curvas de nivel topográfico indicando así el encharcamiento producido por la descarga del acuífero (Fig. 10).



**Figura 10** Áreas de recarga y descarga en un mapa de isopiezas

Fuente: Adaptado de Fundamentos de Hidrogeología (pág. 229), por (Martínez A., Martínez S., & Castaño C., 2006)

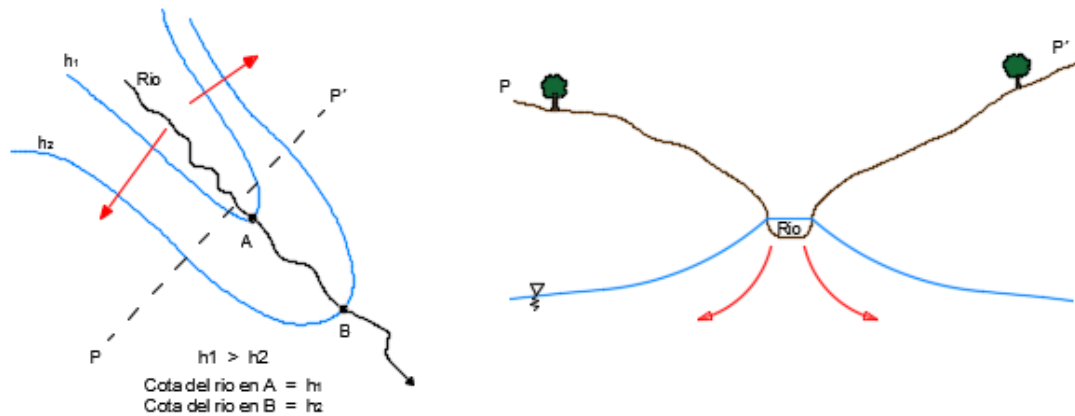
- c)** En el trazado de las isopiezas ha de tenerse en cuenta la naturaleza de los límites de la unidad hidrogeológica.

Una masa de agua superficial conectada hidráulicamente al acuífero es a efectos prácticos, un borde de nivel constante y, por lo tanto, la línea de contacto con el acuífero será una isopieza cuyo valor será la cota del agua, por ejemplo, la línea de costa en una playa sería la isopiezas de valor cero ( $h = 0$  m).

Los límites impermeables (flujo nulo) constituyen líneas de corriente puesto que una partícula que los alcance continuará su camino sobre ellos según la dirección que marque el gradiente hidráulico y el sentido del potencial decreciente. Las líneas de corriente e isopiezas han de ser perpendiculares entre sí, es decir las isopiezas deben ser perpendiculares a los límites impermeables.

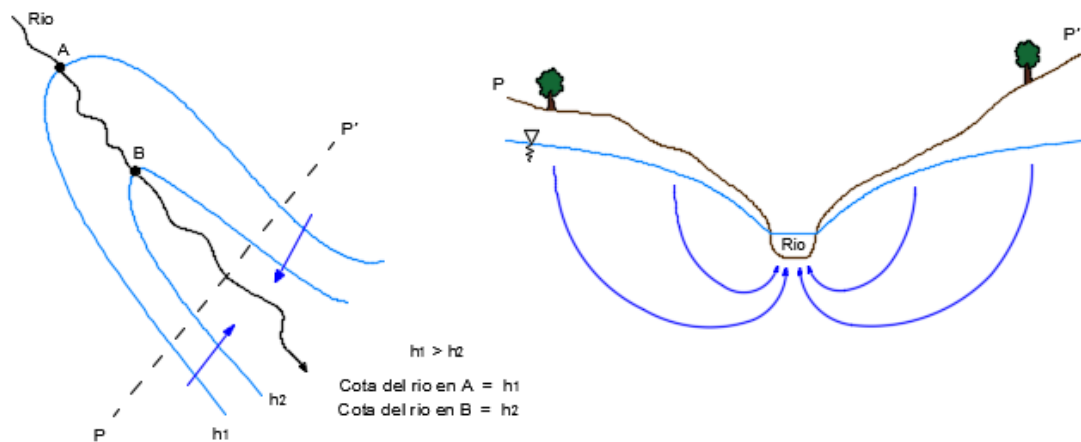
- d)** Relación Acuífero–Río, si un río está conectado hidráulicamente a un acuífero, los puntos de la lámina superficial del agua en el río debe ser también puntos de la superficie freática. Según esto, las isopiezas deben cortar al río en los puntos en que la cota del río y el valor de la isopiezas coincidan.

Si el flujo definido por las líneas de corriente diverge desde el río hacia el acuífero, se dice que el río es perdedor puesto que está recargando el acuífero (ver fig. 11), si el flujo converge hacia el río se dice que es un río ganador puesto que está drenando al acuífero (ver fig. 12). La transferencia de agua río-acuífero depende de la diferencia de potencial hidráulico entre ambos, del área de contacto entre el río y acuífero, conductividad hidráulica y espesor de la capa de limos que recubre el lecho del río.



**Figura 11** Relación Acuífero-Río en un mapa de isopiezas (Río perdedor conectado hidráulicamente al acuífero)

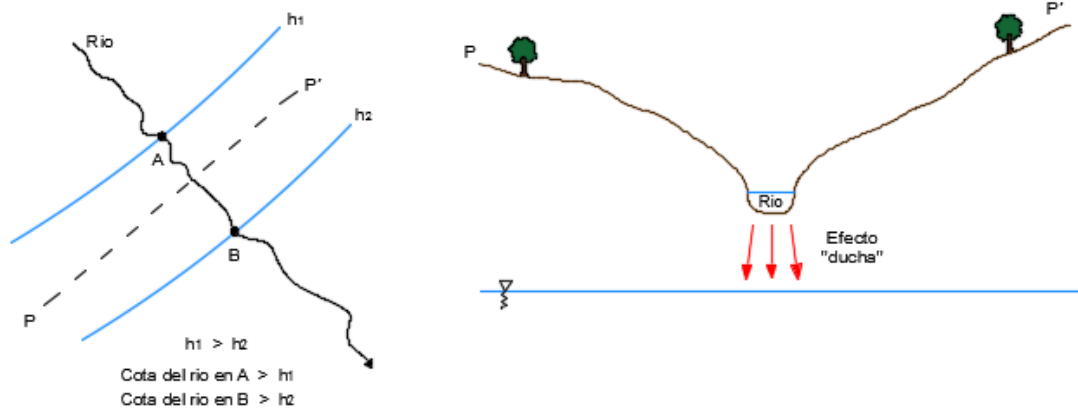
Fuente: Adaptado de Fundamentos de Hidrogeología (pág. 231), por (Martínez A., Martínez S., & Castaño C., 2006).



**Figura 12** Relación Acuífero-Río en un mapa de isopiezas (Río ganador conectado hidráulicamente al acuífero)

Fuente: Adaptado de Fundamentos de Hidrogeología (pág. 231), por (Martínez A., Martínez S., & Castaño C., 2006).

Cuando un río está desconectado de un acuífero la cota del agua en el mismo está siempre por encima de la superficie freática, en esta situación la cesión de agua del río al acuífero se llama efecto “ducha” y es independiente de la diferencia del potencial hidráulico entre ambos. Se dice que el río está colgado (ver fig. 13).



**Figura 13** Relación Acuífero-Río en un mapa de isopiezas (Río colgado)

Fuente: Adaptado de Fundamentos de Hidrogeología (pág. 231), por (Martínez A., Martínez S., & Castaño C., 2006).

La magnitud del efecto ducha hay que estimarla a partir de aforos secuenciales a lo largo de un tramo del río en el que no haya otras entradas o salidas de agua, o bien estén cuantificadas.

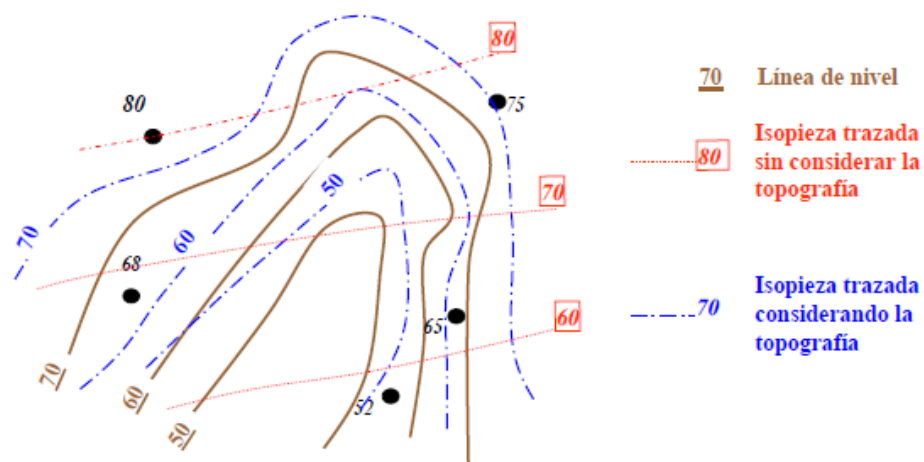
- e) Reflejo en las isopiezas de los cambios en la transmisividad del acuífero, teniendo en cuenta que el caudal circulante se conserva constante a lo largo de un tubo de flujo, según la ley de Darcy un aumento en el gradiente hidráulico debe llevar aparejada una disminución en la transmisividad y por lo tanto una disminución en el gradiente debe implicar un aumento en la transmisividad del acuífero.

Un aumento de transmisividad según la definición de este parámetro, implicara un aumento de la conductividad hidráulica o del espesor saturado, o de ambos, análogo razonamiento puede hacerse cuando la transmisividad disminuye.

Así mismo Manzano Arellano (2008), recomienda tener en cuenta los siguientes requisitos y precauciones a la hora de dibujar la traza de las isopiezas:

1. La traza de las isopiezas debe ser coherente con la topografía (Fig. 14). En acuíferos libres la superficie freática no puede estar más alta que el terreno (salvo que se sepa que las isopiezas intersectan la topografía, generando descarga a manantiales, ríos, lagos, barrancos, etc.). En acuíferos confinados las isopiezas sí pueden estar más elevadas que la superficie del terreno, es el caso de los niveles piezométricos de partes profundas del acuífero cerca de la zona de descarga del mismo.

En la figura 14 se puede ver la diferencia en el trazado de las isopiezas en un acuífero libre situado en una zona de relieve abrupto al tener o no en cuenta la topografía. Las isopiezas trazadas sin considerar la topografía indicarían que el barranco está lleno de manantiales, cosa que no es cierta.

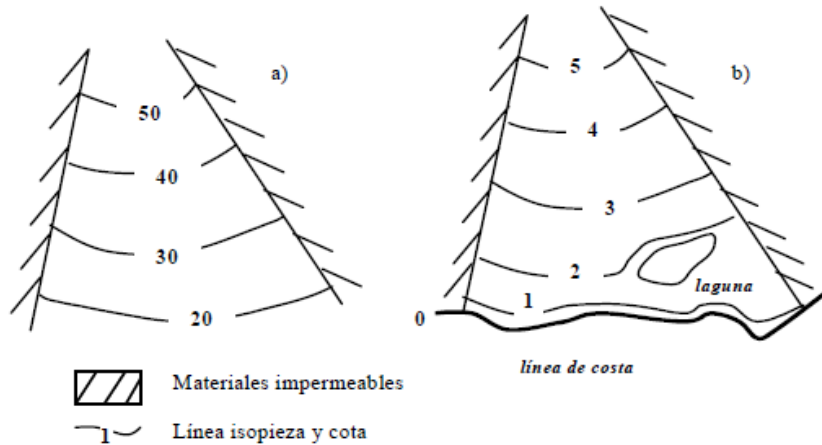


**Figura 14** Trazado de isopiezas con respecto a la topografía

Fuente: Obtenida de trazado e interpretación de superficies piezométricas (p. 5), por Manzano Arellano, 2008 ( [https://www.upct.es/~minaees/practica2\\_explicacion.pdf](https://www.upct.es/~minaees/practica2_explicacion.pdf)).

2. Las isopiezas deben ser perpendiculares a los límites impermeables del acuífero (Fig. 15a) y paralelas a las superficies y líneas de nivel

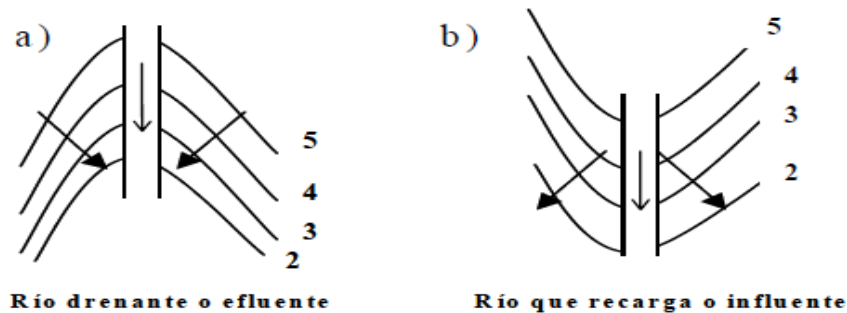
constante (lagos, mar, etc.) que tengan conexión hidráulica con el acuífero (Fig. 15b).



**Figura 15** Trazado de isopiezas con respecto a límites impermeables y cuerpos superficiales de agua

Fuente: Obtenida de trazado e interpretación de superficies piezométricas (p. 5), por Manzano Arellano, 2008 ([https://www.upct.es/~minaees/practica2\\_explicacion.pdf](https://www.upct.es/~minaees/practica2_explicacion.pdf)).

3. Relación entre las líneas de drenaje del acuífero y las isopiezas: las isopiezas se cierran de forma cóncava sobre las líneas que drenan al acuífero (Fig. 16a) y de forma convexa sobre las líneas que son drenadas por el acuífero (Fig. 16b).



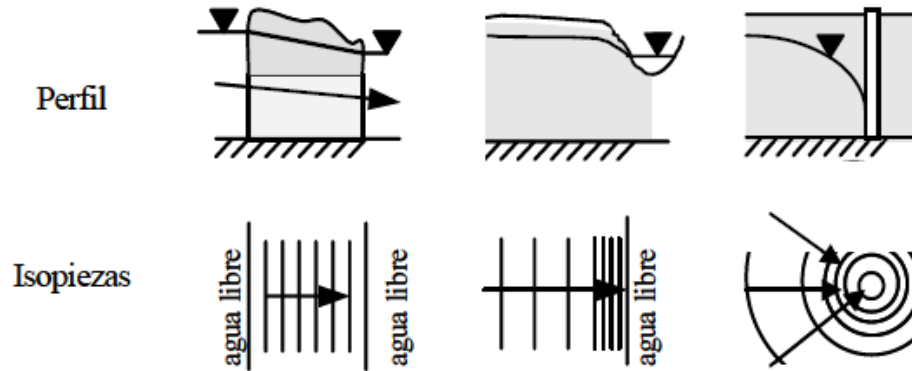
**Figura 16** Relación entre las líneas de drenaje del acuífero y las isopiezas

Fuente: Obtenida trazado e interpretación de superficies piezométricas (p. 6), por Manzano Arellano, 2008 ([https://www.upct.es/~minaees/practica2\\_explicacion.pdf](https://www.upct.es/~minaees/practica2_explicacion.pdf)).

4. La separación espacial entre isopiezas será menor cuando aumente el gradiente hidráulico ( $i$ ) por alguna de estas razones: disminución



de la permeabilidad del medio; existencia de una zona de descarga natural del acuífero; existencia de bombeos (Fig. 17).



**Figura 17** La separación espacial entre isopiezas con respecto al gradiente hidráulico

Fuente: Obtenido de trazado e interpretación de superficies piezométricas (p. 6), por Manzano Arellano, 2008 ([https://www.upct.es/~minaees/practica2\\_explicacion.pdf](https://www.upct.es/~minaees/practica2_explicacion.pdf)).

La separación entre isopiezas disminuye cerca de áreas de descarga natural y de pozos en bombeo, el gradiente hidráulico aumenta

5. Las isopiezas cuyo trazado sea deductivo, es decir, no estén apoyadas en niveles medidos, se dibujarán con trazo discontinuo y se indicarán en la leyenda como “trazado supuesto”.
6. Los puntos con valores de nivel anómalos respecto a los de su entorno deben ser desechados en el trazado de las isopiezas: un valor anómalo sin causa técnica (Ej. bombeos) o hidrogeológica conocida (Ej. cambios espaciales de permeabilidad) puede corresponder a un error de medida, a un nivel de otro acuífero distinto al que se está estudiando, a un pozo/sondeo en deficiente estado de conservación y con conexión hidráulica con el acuífero limitada, a un pozo/sondeo ranurado en varios niveles acuíferos (caso de acuíferos multicapa) y con entrada preferente de agua por uno de esos niveles.

## 2.3. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS DE UN ACUÍFERO

Según Villanueva Martinez & Iglesias Lopez (1984), los parámetros hidrogeológicos más importante son:

- La conductividad Hidráulica o permeabilidad (K).
- La transmisividad (T).
- El coeficiente de almacenamiento (S).

### 2.3.1. Permeabilidad o Conductividad hidráulica (k)

La permeabilidad o conductividad hidráulica, se define como el caudal ( $m^3/día$ ) que pasa por una sección unitaria ( $1 m^2$ ) del acuífero con gradiente hidráulico igual a 1. Por consiguiente, la conductividad hidráulica ( $m/día$ ) indica la capacidad que tiene un acuífero para permitir el movimiento del agua (Mayta Lopez & Duran Nuñez del Prado, 2017).

Otra definición según Villanueva Martinez & Iglesias Lopez (1984), la permeabilidad es el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero bajo la influencia de un gradiente unitario, a temperatura de campo.

$$K = \frac{c*d^2*\gamma}{\mu} \quad (1)$$

Donde:

$c$  = Constante adimensional.

$d^2$  = Factor que depende de la superficie intergranular.

$\gamma$  = Peso específico del líquido.

$\mu$  = Viscosidad del líquido a la temperatura  $t^\circ$ .

El termino  $cd^2 = k$ , se conoce como permeabilidad específica o intrínseca y depende únicamente de las características del terreno.

$$K = [L/T]$$

L= Dimensión longitud.

T = Dimensión tiempo.

La permeabilidad  $K$  se obtiene como cociente entre la transmisividad  $T$  y el espesor del acuífero  $b$  (Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984).

$$K = \frac{T}{b} \quad (2)$$

Donde:

$K$ : Permeabilidad o conductividad hidráulica (m/día).

$T$ : Transmisividad ( $m^2/día$ ).

$b$ : Espesor del acuífero saturado (m).

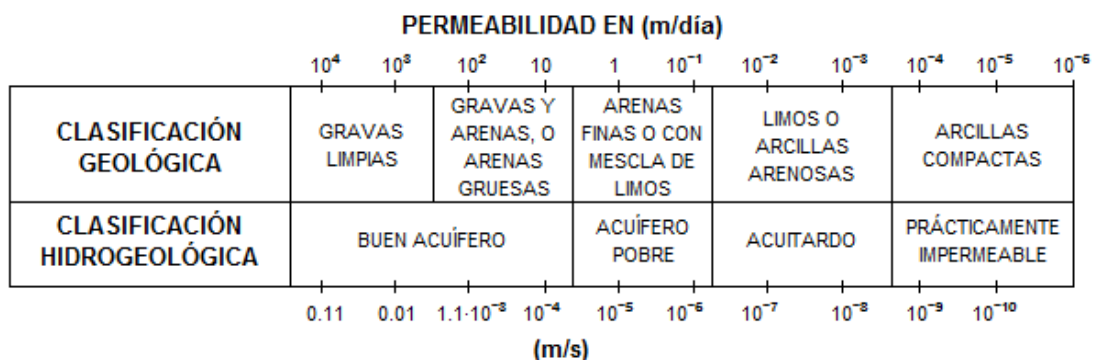
**Tabla 2** Valores de la permeabilidad

<b>K (m/día)</b>	<b>Calificación estimada</b>
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

Fuente: Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

La permeabilidad es una medida muy característica de la textura del acuífero, pero no representa como la transmisividad las posibilidades de ceder agua. Un acuífero muy permeable, pero de poco espesor, puede ser poco transmisor y como consecuencia, los pozos que en el mismo se construyan, no serán muy caudalosos.

A efectos de trabajar con acuíferos semiconfinados, conviene tener en cuenta los valores de la permeabilidad de los materiales semipermeables (limo arenoso, limo, arcilla limosa y arcillas algo arenosas). En estos, la  $K$  suele estar comprendida entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$  m/día. siendo  $10^{-3}$  un valor medio representativo que se suele usar con mucha frecuencia. Los terrenos impermeables tienen valores de  $K$  inferiores a los  $10^{-4}$  m/día.



**Figura 18** Clasificación de materiales sedimentarios según su permeabilidad (según Custodio y Llamas, 1983)

Fuente: Adaptado de Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego (p. 6), por (Villarroya, 2009).

### 2.3.2. *Transmisividad (T)*

Es la cantidad de agua que transmite un acuífero a través de una franja vertical (prisma) de terreno; de altura igual a todo el espesor saturado, de ancho unitario y bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad (Mayta Lopez & Duran Nuñez del Prado, 2017).

Según (Villanueva Martínez & Iglesias Lopez, 1984), define La transmisividad como 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.

Partiendo de esta definición, sus dimensiones son las siguientes:

$$T = [(L^3 / T) / L] = [L^2 / T]$$

T = Dimensión tiempo.

L = Dimensión longitud.

Lo más común es que la transmisividad se mida en m<sup>2</sup>/día, m<sup>2</sup>/hora o m<sup>2</sup>/segundo. Sin embargo, la unidad que da cifras más manejables es el m<sup>2</sup>/día, por lo que se aconseja sea usada en todos los ensayos.

A efectos de irse familiarizando con esta unidad, se dan los valores de la Tabla 3.

**Tabla 3** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

La transmisividad es variable en acuíferos libres porque su espesor saturado varía con las oscilaciones de la superficie freática (época de lluvia y estiaje), en cambio en un acuífero confinado su espesor es constante, por consiguiente, la transmisividad también.

La transmisividad solo puede ser calculada mediante ensayos de bombeo, generalmente por el método de Jacob aplicando la siguiente fórmula:

$$T = 0.183 * \frac{Q}{\Delta d} \quad (3)$$

Donde:

T: Transmisividad [m<sup>2</sup>/día].

Q: Caudal [m<sup>3</sup>/día].

Δd: Pendiente de la recta para un ciclo logarítmico.

### 2.3.3. Coeficiente de almacenamiento (S)

El coeficiente de almacenamiento indica el volumen de agua que se obtiene al disminuir en una unidad el nivel piezométrico de un prisma de

acuífero de base unitaria (1 m x 1 m) y altura igual al espesor saturado del mismo. Se designa con la letra S, no tiene dimensiones y se expresa como porcentaje (%) (Mayta Lopez & Duran Nuñez del Prado, 2017).

En los acuíferos libres el Coeficiente de almacenamiento equivale a la porosidad eficaz (me), ya que el agua procede del vaciado o drenaje de los poros. En los acuíferos confinados el agua procede de la compresión física (apretamiento) del acuífero y la expansión del agua contenida en este, cuando la presión o carga (nivel del agua) desciende por efecto del bombeo, siendo esta la única forma de obtener agua de un acuífero confinado (Mayta Lopez & Duran Nuñez del Prado, 2017).

Según (Villanueva Martinez & Iglesias Lopez, 1984), los valores más significativos de coeficientes de almacenamiento, a efectos prácticos y según datos obtenidos de más de 500 ensayos de bombeo realizados por el Instituto Geológico y Minero de España, se resumen en la tabla 4.

**Tabla 4** Valores del coeficiente de almacenamiento

Tipo de material permeable	Forma del funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
<b>Kárstico:</b>		
Caliza y dolomías jurásicas.	Libre	$2 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$5 \times 10^{-5}$
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
<b>Poroso intergranular:</b>		
Cravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3}$
	Confinado	$10^{-4}$
<b>Kársticos y porosos:</b>		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

**Fuente.** Adaptado de Pozos y acuíferos "Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo". (p. 23), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

Estos valores son los que parecen ser más adecuados para introducir por tanteo en los ensayos de bombeo, cuando las circunstancias particulares de la prueba no hayan permitido el cálculo directo.

Los valores de S que no guarden un orden de magnitud con los reseñados deben, en principio, ser tomados con recelo.

## **2.4. ENSAYOS DE BOMBEO**

Un ensayo de bombeo es un método de análisis de los pozos de captación de aguas subterráneas y del acuífero en que se encuentran, es una prueba realizada en condiciones predeterminadas y controladas.

En general responden a uno de los dos objetivos siguientes:

- ✓ El primero es determinar las características hidráulicas de los acuíferos, este tipo de pruebas estudian al acuífero mismo y al pozo, más no a la bomba.
- ✓ El segundo es proporcionar los datos necesarios para determinar la capacidad específica o la relación caudal-abatimiento, para seleccionar el equipo de bombeo adecuado.

### ***2.4.1. Realización de los ensayos de bombeo***

Un ensayo de bombeo consiste en bombear un pozo que esté perforado en el acuífero, durante un cierto tiempo, a un determinado caudal y medir la evolución de niveles piezométricos debido al bombeo, tanto en el pozo de bombeo como en pozos cercanos de observación.

En la tabla 5 se sugiere una secuencia de intervalos de tiempos aplicables para la medición de niveles de agua, en el pozo de bombeo, así como para los pozos de observación.

**Tabla 5** Secuencia de intervalos de tiempo para la medición de niveles de agua durante la realización de una prueba de bombeo

<b>N° de Lectura</b>	<b>Tiempo a partir del Inicio de bombeo</b>	<b>N° de Lectura</b>	<b>Tiempo a partir del Inicio de bombeo</b>
1	Antes de iniciar el bombeo o antes de suspenderlo	17	30 minutos
		18	40 minutos
		19	50 minutos
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 minutos	24	2.30 hora
7	3 minutos	25	3 hora
8	4 minutos	26	4 hora
9	5 minutos	27	5 hora
10	6 minutos	28	7 hora
11	8 minutos	29	9 hora
12	10 minutos	30	13 hora
13	12 minutos	31	19 hora
14	15 minutos	32	25 hora
15	20 minutos	33	31 hora
16	25 minutos	34	33 hora

Fuente: Adaptado de Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (p. 32).  
(Comisión Nacional del Agua, 2007).

#### **2.4.2. Duración de la prueba**

El tiempo de duración de la prueba de bombeo, depende del tipo de acuífero, grado de exactitud deseada para evaluar sus características hidráulicas y condiciones propias del pozo de extracción, es deseable que el bombeo se prolongue hasta alcanzar condiciones de flujo permanente.



### 2.4.3. Tipos de ensayos de bombeo

Cuando se pretende realizar un ensayo de bombeo, lo primero que debemos determinar es el tipo de ensayo que vamos a realizar, en la tabla 6 se establecen distintos tipos de ensayos y el método de análisis propuesto para su interpretación, según el tipo de acuífero.

**Tabla 6** Tipos de ensayos de bombeo

<b>Tipos de acuíferos</b>	<b>Tipos de ensayo</b>	<b>Método de análisis</b>
Confinado	Régimen permanente	Formula de Thiem
	Régimen variable	Interpretación de Descensos Interpretación de recuperación
Semiconfinado	Régimen permanente	Formula de recuperación de Theis
	Régimen Variable	Interpretación de Descensos Interpretación de recuperación
Libre	Régimen permanente	Formula de Thiem y corrección de Jacob Formula de Dupuit
	Régimen variable	Formula de Theis
		Aproximación logarítmica de Jacob
		Interpretación de Descensos
		Corrección de Dupuit Formula de Boulton
		Formula de Neuman
	Interpretación de recuperación	Formula de recuperación de Theis

Fuente: Adaptado de manual de pruebas de bombeo (p.12), por Mayta López & Duran Núñez del Prado, 2017.

Un ensayo a caudal constante es aquel en el que se mantiene el mismo caudal a lo largo de todo el ensayo, si los niveles no varían con el tiempo sería un ensayo a caudal constante en régimen permanente. Por el contrario, si hay alguna variación en los niveles sería un ensayo a caudal constante en régimen

variable. Se puede dar el caso de que en el mismo ensayo se puedan dar los dos casos, por ejemplo: cuando un bombeo a caudal constante produce un descenso de niveles (régimen variable) que se estabilizan pasado un tiempo de bombeo (régimen permanente).

## **2.5. ENSAYOS DE RECUPERACIÓN**

Los ensayos de recuperación consisten en medir la evolución del nivel del agua después de la parada de la bomba en el pozo que ha estado bombeando durante un tiempo  $t$ .

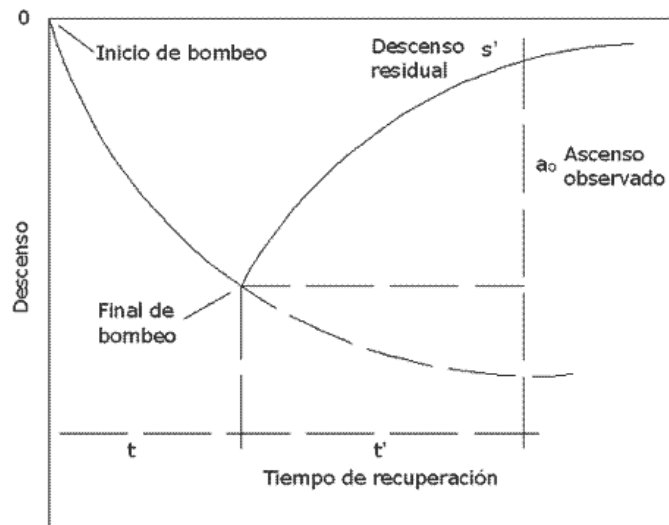
Es decir, la recuperación es un proceso natural, gravitatorio, no influenciado por ningún bombeo, de ahí su importancia.

En este tipo de ensayo se aplica el principio de superposición de efectos, es decir, que a partir del momento de la parada se considera que el pozo sigue funcionando, pero se superpone a él, el efecto de otro pozo que comenzaría a funcionar en el momento de la parada con el mismo caudal, pero de signo contrario.

En la práctica, inmediatamente después de finalizado el bombeo, se comienza a medir los descensos residuales, profundidad del nivel con respecto al nivel estático antes de comenzar el bombeo, durante un tiempo  $t'$  (fig. 19).

En los ensayos de recuperación, se interpreta la evolución de los niveles de agua 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, los datos del descenso freático y de la recuperación en estos pozos, son también útiles para determinar las propiedades del pozo y del acuífero.



**Figura 19** Grafica de recuperación

Fuente: Adaptada de fundamentos de hidrogeología (p. 154), por Martínez A., Martínez S., & Castaño C., 2006.

### **2.5.1. Métodos de interpretación (régimen variable)**

Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones del ensayo en base a los datos que se obtienen una vez que el pozo detiene su extracción de agua, a partir de la parada, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial. Estos métodos se basan en el análisis de la “recuperación” o evolución del ascenso de niveles posterior a la parada de la bomba.

#### **2.5.1.1. Interpretación de la evolución de niveles después de la parada de la bomba**

Según Villanueva Martínez & Iglesias López (1984), para analizar la evolución de los niveles después de la parada de la bomba en el pozo hay que empezar por simular matemáticamente esta parada. Para ello puede procederse razonando, que el efecto de parar un pozo que lleva bombeando un tiempo  $t$  a caudal constante  $Q$  es el mismo que simular que el pozo no se para y que a partir del instante  $t'$  se le inyecta un caudal constante  $Q$ .

El descenso que se observa en el pozo o descenso residual, diferencia entre los niveles estático y dinámico, será como consecuencia de la diferencia

entre el descenso producido por el bombeo desde que se inició el mismo y el ascenso producido por la inyección desde el momento de la parada.

(Sánchez San Román, 2012) aplica este análisis en la figura 20, donde se han señalado descensos a los 240 minutos, cuando llevaba parado 1 hora, si el bombeo no se hubiera detenido (hubiera bombeado 4 horas) el descenso alcanzado hubiera sido de ( $d_B$ ). La inyección virtual de un caudal idéntico al bombeado, tras 1 hora, habría generado un ascenso ( $a_r$ ). Por tanto, el descenso residual ( $d_r$ ) es:

$$d_r = d_B - a_r \quad (4)$$

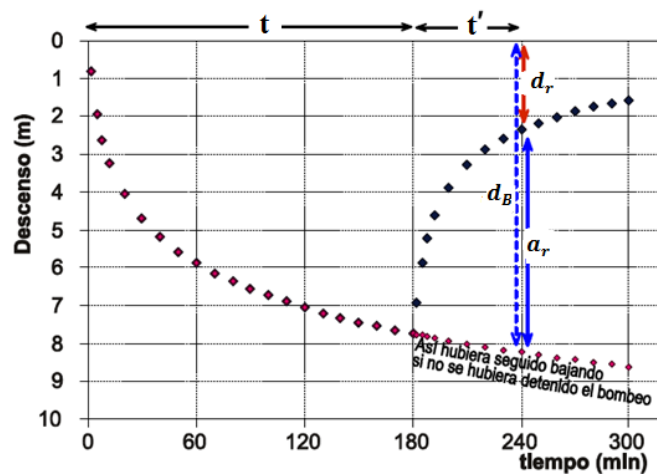
Donde:

$d_r$  = descenso residual, lo observado realmente.

$d_B$  = descenso si no se hubiera detenido el bombeo.

$a_r$  = ascenso debido a la recuperación o a la supuesta inyección de un caudal idéntico al bombeado.

Esta idea general es válida para cualquier acuífero, sólo habría que aplicar las fórmulas adecuadas a acuíferos semiconfinados o libres. Pero vamos a ver aquí brevemente la aplicación a acuíferos confinados, que siempre es lo más simple.

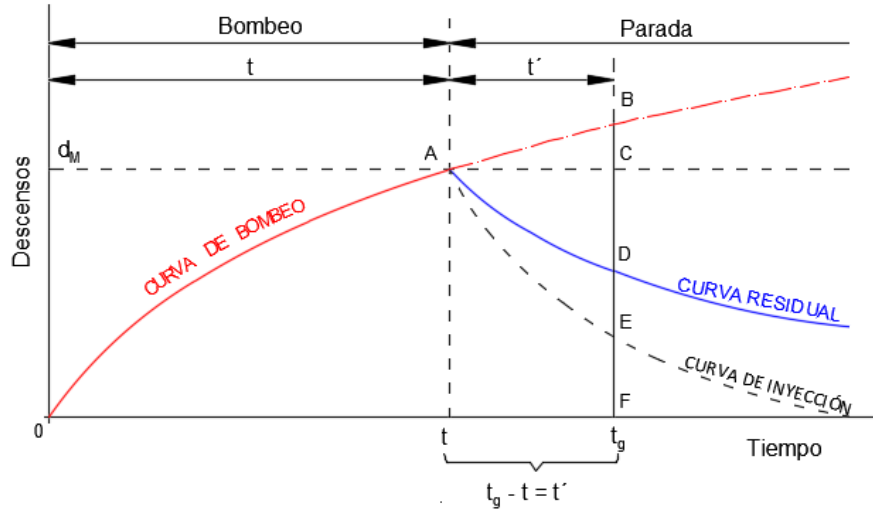


**Figura 20** Análisis del descenso residual ( $d_r$ )

Fuente: Adaptado de Hidrología e Hidrogeológica (p. 192), por Sánchez San Román, 2012.

### 2.5.1.2. Método de Jacob (Villanueva & Iglesias, 1984)

La deducción matemática se resuelve con la ayuda de la figura 21.



**Figura 21** Esquema para la deducción del valor del descenso residual ( $d_r$ ) en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada

Fuente: Adaptado de pozos y acuíferos (p. 23), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

El pozo está sometido a un bombeo con caudal  $Q$  que teóricamente no se interrumpe, y la curva de descensos producidos es  $\overline{OAB}$ .

Cuando ha transcurrido un tiempo  $t$  y el descenso producido es  $d_M$ , se para el pozo, o lo que es lo mismo se simula una inyección de caudal  $Q$ . La curva de ascensos teóricos vendrá dada por  $\overline{AE}$ , obtenida llevando dichos ascensos teóricos a partir de la horizontal de  $d_M$  y en el sentido negativo del eje de ordenadas.

La curva residual, que en rigor es la observada en campo, será la representada por  $\overline{AD}$  diferencia de las dos anteriores.

En un tiempo genérico  $t_g$ , desde que se inició el bombeo, el pozo llevará parado un tiempo  $t' = t_g - t$ . En este momento, el descenso  $d_B$ , debido al bombeo será:

$$d_B = \overline{FB} = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{2.25 T(t+t')}{r_p^2 S} \quad (5)$$

Siendo:

Q= Caudal de bombeo constante.

T= Transmisividad

$r_p$ = Radio del pozo.

S= Coeficiente de almacenamiento.

t = tiempo que duro el bombeo real.

$t'$ = Tiempo que ha transcurrido desde que se paró el bombeo.

El ascenso  $d_1$ , producido por la inyección a caudal Q, que se simula a partir del tiempo t, que es cuando se interrumpe el bombeo, viene dada por:

$$d_1 = \overline{CE} = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{2.25 T t'}{r_p^2 S} \quad (6)$$

Evidentemente, puede utilizarse la relación de Jacob, que prácticamente es siempre válida en el pozo de bombeo.

El descenso residual  $d_R$ , que es el que se observa en el pozo. es la diferencia entre el nivel estático anterior a iniciar el bombeo y el nivel que se mide realmente en el tiempo ( $t_g = t + t'$ .)

Vendrá dado por:

$$d_R = \overline{FD} = \overline{FB} - \overline{CE} \quad (7)$$

y, por tanto:

$$d_R = d_B - d_1 \quad (8)$$

$$d_R = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{2.25 T(t+t')}{r_p^2 S} - 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{2.25 T t'}{r_p^2 S} \quad (9)$$

$$d_R = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{\frac{2.25 T(t+t')}{r_p^2 S}}{\frac{2.25 T t'}{r_p^2 S}} \quad (10)$$

De donde:

$$d_R = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{t+t'}{t'} \quad (11)$$

Expresión en la que, si se toma  $d_R$ , como función, y  $\log(t + t')/t'$  como variable, representa una recta de la forma:  $y = mx$

En la que:

$$d_R = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{t+t'}{t'}$$

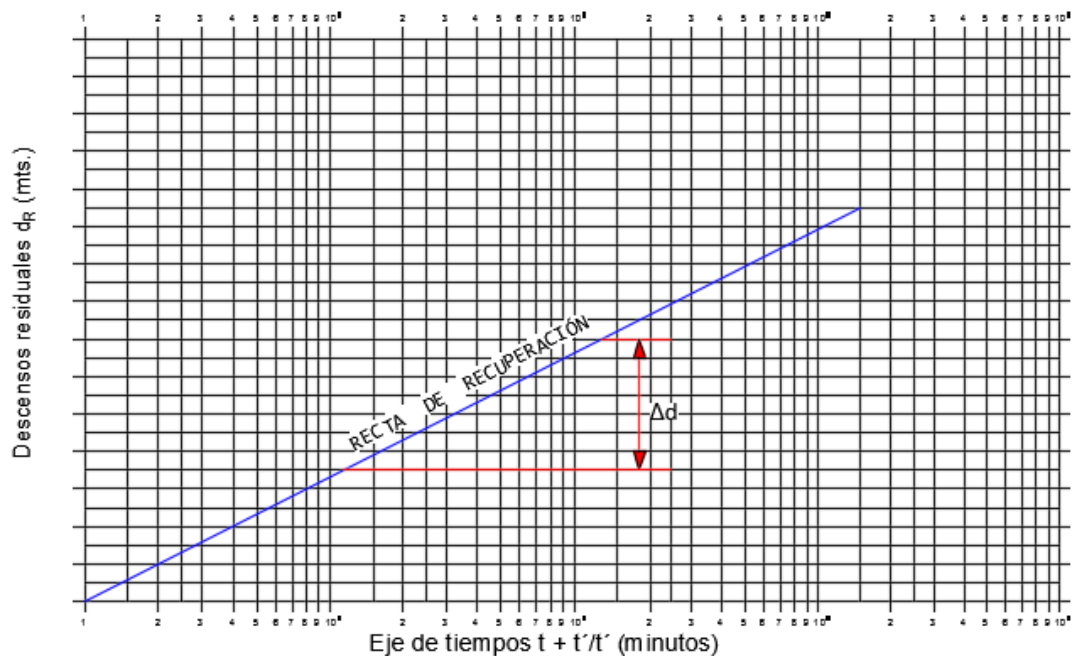
$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_y \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_m \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_x$

$$y = d_R$$

$$x = \log \frac{t + t'}{t'}$$

$$m = 0.183 \frac{Q}{T} \tag{12}$$

Esta recta pasa por el origen de coordenadas y queda representada en el gráfico como se muestra en la figura 22.



**Figura 22** Recta de recuperación

Fuente: Adaptado de pozos y acuíferos "Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo" (p. 117), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

La  $T$ , que es el parámetro que puede obtenerse en el análisis de la recuperación, se saca directamente de la pendiente de la recta  $m$  haciendo uso de la relación (12).

$$T = 0.183 \frac{Q}{m}$$

Como ya se sabe  $m = \Delta d$ , siendo  $\Delta d$  la caída por ciclo logarítmico y, por tanto:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d} \quad (13)$$

El caudal de bombeo  $Q$  debe expresarse en  $m^3/\text{día}$  para obtener  $T$  en  $m^2/\text{día}$ .

#### **2.5.1.2.1. Procedimiento en campo**

La forma de operar en campo es la siguiente:

Se efectúa un bombeo a caudal constante  $Q$ . Al cabo de un tiempo  $t$ , la depresión es  $d_M$ , y se interrumpe el bombeo. Los niveles, a partir de este momento, empiezan a subir y las depresiones a decrecer.

Las depresiones que se van midiendo son las depresiones o descensos residuales  $d_R$ . A partir de dicha parada, se miden los niveles (depresiones) con una secuencia en el tiempo análoga a la ya descrita para los bombeos, acorde con una escala logarítmica. Por ejemplo, minutos 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, etc. Cada uno de estos minutos representa un tiempo  $t'$ , mientras que el tiempo de bombeo  $t$  es fijo.

Se representan en un gráfico semilogarítmico los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica). Se ajusta una recta a los puntos obtenidos y se obtiene el valor de  $T$  mediante la relación (13).

Esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de



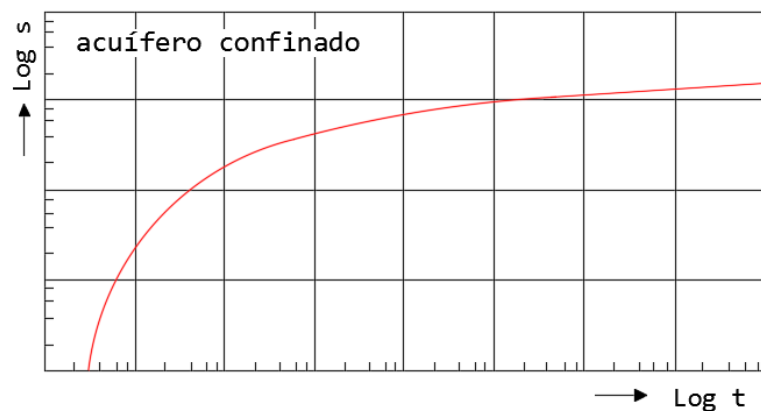
coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

## 2.6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

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 (Comisión Nacional del Agua, 2007).

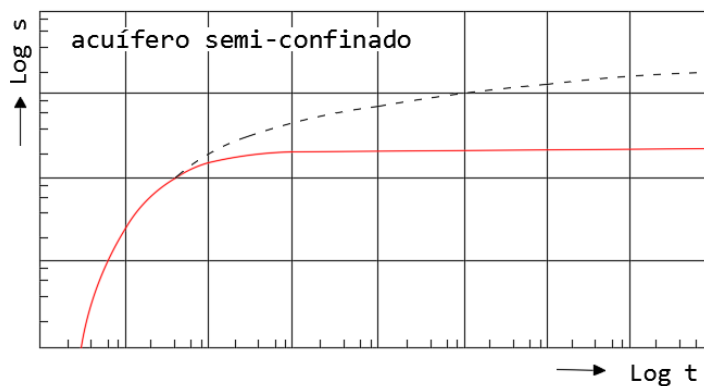
Tomando en cuenta las características del estrato que constituye la frontera superior del acuífero y considerando que el estrato que lo subyace es impermeable, se puede recomendar un esquema de la caracterización del tipo de acuífero de que se trate, mostrando, además, para cada caso la curva típica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

En las figuras 23, 24, 25, 26 se presentan las curvas típicas Abatimiento-Tiempo más comunes para cada tipo de acuífero y régimen de flujo.



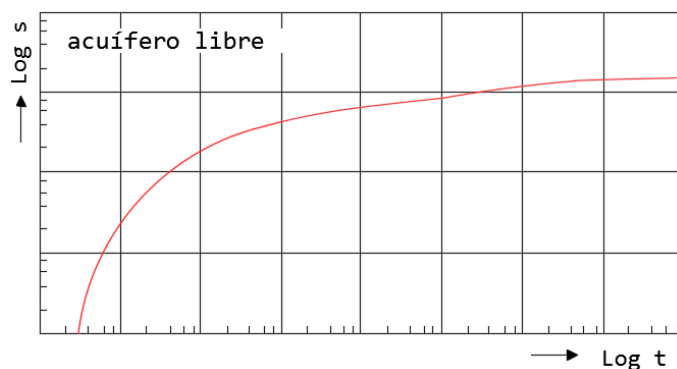
**Figura 23** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

fuerza. adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.



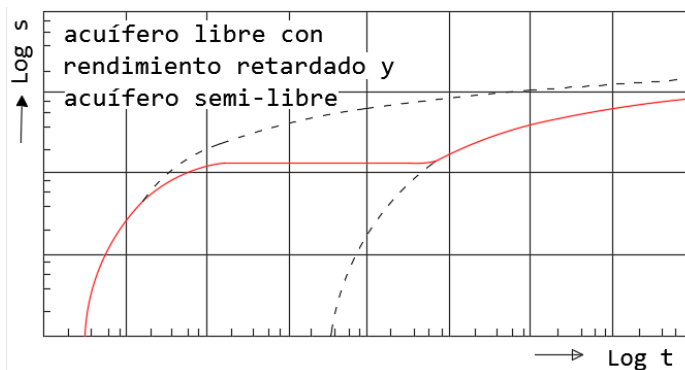
**Figura 24** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero semiconfinado

fuelle: adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por kruseman & de ridder, 1970.



**Figura 25** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero libre

fuelle: adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por kruseman & de ridder, 1970.



**Figura 26** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero libre con rendimiento retardado y acuífero semi-libre

Fuelle: Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

## CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está ubicada dentro de la cuenca del río Guadalquivir o Valle Central de Tarija, se encuentra situada en el Sur de Bolivia, oeste del departamento de Tarija, provincia cercado, entre los paralelos  $21^{\circ}13'$  y  $22^{\circ}05'30''$  de latitud sur y los meridianos  $64^{\circ}25'$  y  $65^{\circ}05'$  de longitud oeste (Ver Fig. 27).

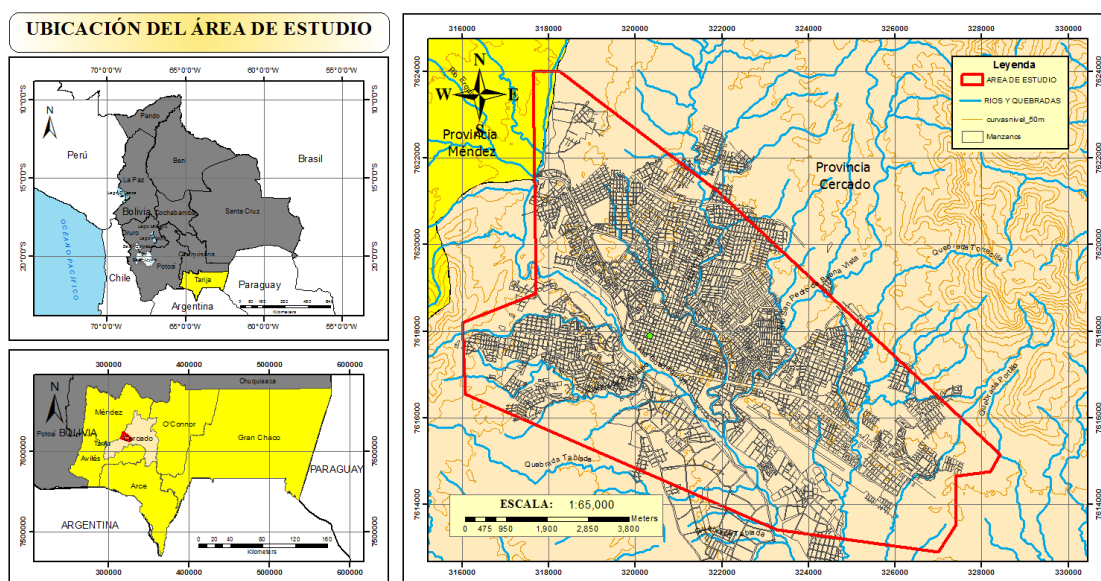


Figura 27 Ubicación del área de estudio

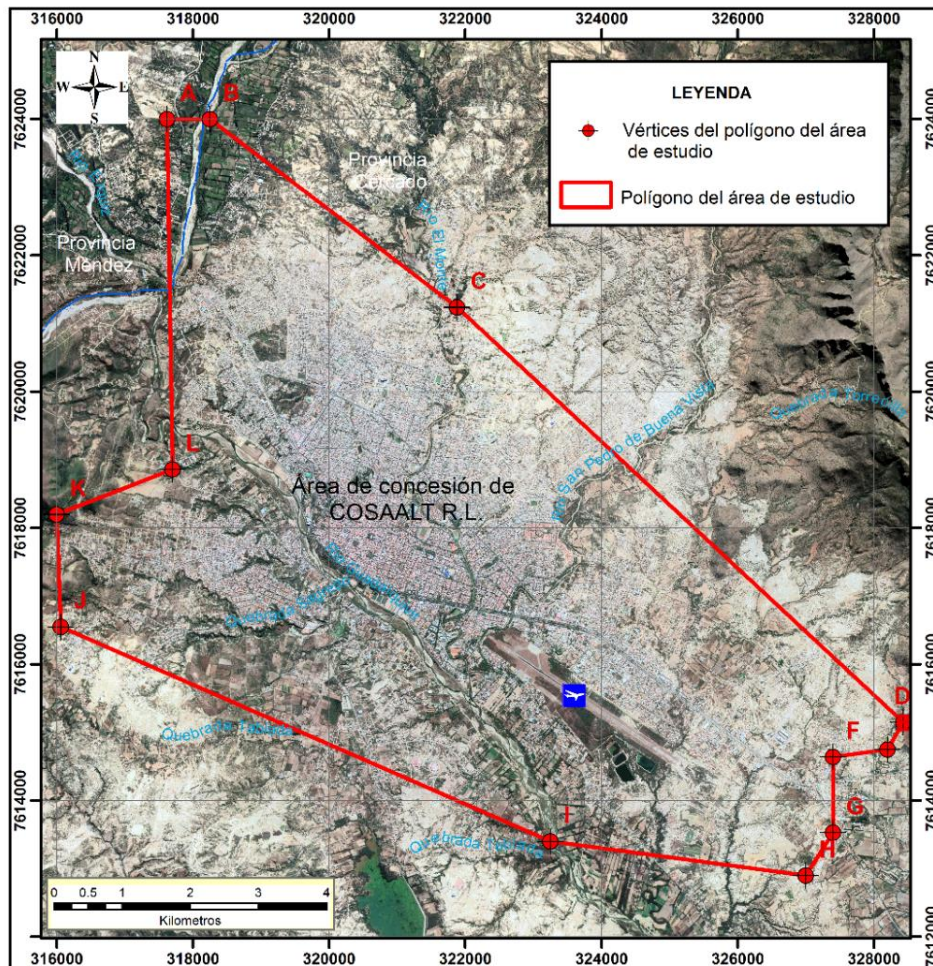
### 3.2. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio, se encuentra delimitado por el polígono (fig. 28), cuyos vértices corresponden con las coordenadas presentadas en la tabla 7, específicamente este polígono corresponde al área de concesión de COSAALT R.L. y abarca toda la zona urbana de la ciudad de Tarija en el municipio de Cercado, tiene una superficie total de 6768.87 hectáreas.

**Tabla 7** Coordenadas área de concesión de COSAALT R.L.

Nº	VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	A	317620	7624000
2	B	318250	7624000
3	C	321880	7621240
4	D	328430	7615150
5	E	328200	7614750
6	F	327400	7614640
7	G	327400	7613530
8	H	327000	7612900
9	I	323250	7613400
10	J	316060	7616550
11	K	316000	7618200
12	L	317700	7618860

Fuente: COSAALT R.L.



**Figura 28** Delimitación del área de estudio

### **3.3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

A continuación, se presenta una breve descripción de algunas características generales del área de estudio que son importantes conocer, para realizar cualquier estudio, algunas de ellas influyen directamente en la evaluación de las aguas subterráneas y otras influyen de manera indirecta.

#### **3.3.1 Características climatológicas**

Con la finalidad de tener un mejor conocimiento previo de las condiciones climatológicas donde se encuentra el área de estudio, se ha recopilado información del Diagnóstico del “Plan Maestro Metropolitano de Agua y Saneamiento de Tarija (Documento principal).

##### **3.3.1.1. Clima**

La provincia Cercado en su conjunto posee 7 estaciones climáticas y 18 estaciones pluviométricas, siendo las estaciones más completas las estaciones de El Tejar y El aeropuerto, las mismas ubicadas dentro de la ciudad. El radio urbano prácticamente comprende dos tipos de clima según la metodología de Caldas y Lang, la primera, corresponde a un clima templado árido (24 – 21 °C) que comprende un 95% del área urbana, mientras que el segundo, corresponde a un clima de tipo templado semiárido (21 – 17,5 °C), equivalente sólo al 5% del radio urbano.

##### **3.3.1.2. Precipitación**

La provincia Cercado alberga en su totalidad 18 estaciones pluviométricas, las cuales se utilizaron para determinar la precipitación media anual, dando como resultado una precipitación de 683,8 mm/año. Sin embargo, la precipitación media anual en el radio urbano es 611,8 mm/año, valor resultado del promedio de dos estaciones ubicadas en la ciudad (El tejar y Aeropuerto). La época lluviosa se da en el periodo de octubre hasta abril, caracterizado por precipitaciones cortas con frecuencia e intensidad variable, mientras en el periodo restante (mayo – septiembre) época de estiaje, el déficit de agua en los acuíferos y los drenajes naturales es muy notorio.

### **3.3.1.3. Temperatura**

La temperatura media anual en el área de estudio, es de 17.6 °C y las temperaturas máxima y mínima fueron de 39.3°C y - 8°C respectivamente, según los datos registrados en la estación AASANA del aeropuerto Oriel Lea Plaza.

### **3.3.2. Hidrología**

El río Guadalquivir tiene una longitud aproximada de 70 km desde la naciente en el río Trancas en la parte alta de la serranía de Sama hasta el Angosto de San Luís. La dirección del río es Noreste. Los tributarios de la serranía de Sama se caracterizan por discurrir por terrenos con afloramientos de rocas consolidadas Paleozoicas, que influyen a que el escurrimiento superficial sea intermitente, encauzado por los valles controlados por las estructuras que predominan en la región, la permeabilidad es baja en consecuencia la escorrentía superficial es mucho mayor que la infiltración. El diseño de drenaje es dendrítico grueso.

En cuanto a cuantificación de caudales el único dato disponible es el proporcionado por la estación Obrajes, ubicado en el río Guadalquivir después de la confluencia del río Erquis y Victoria. En base a esta información se estima que por la estación Obrajes escurre un caudal aproximado de 172.566.720 m<sup>3</sup>/año.

### **3.3.3. Geología**

Geológicamente el área de estudio se encuentra cubierto casi en su totalidad por sedimentos fluviolacustres del sistema cuaternario, los mismos que fueron depositados en varias lagunas que se formaron a lo largo de la historia Pleistocena en la era cenozoica.

La era paleozoica está representada por pequeños afloramientos del sistema ordovícico, de los cuales se distinguen la formación Cieneguillas (*oci*) que están compuestas por lutitas grises, concreciones esferoidales generalmente fosilíferas y la formación Iscayachi (*ois*), formada por areniscas,

limonitas y cuarcitas gris verdosas, y del sistema silúrico distingue la formación Tarabuco (*stb*), formada por la intercalación de areniscas, areniscas limosas y lutitas gris verdosas.

### **3.3.3.1. Depósitos cuaternarios**

Al finalizar el periodo terciario y al inicio del cuaternario, se depositaron materiales arenosos y gravosos en todas las cuencas, simultáneamente se producen movimientos epirogénicos que dan lugar a la formación de cuencas cerradas elongadas, llegándose a formar un gran lago, produciéndose una depositación de facie lacustres compuestas por pelitas y una facie fluviolacustre con arcillas y limos, arenas y gravas.

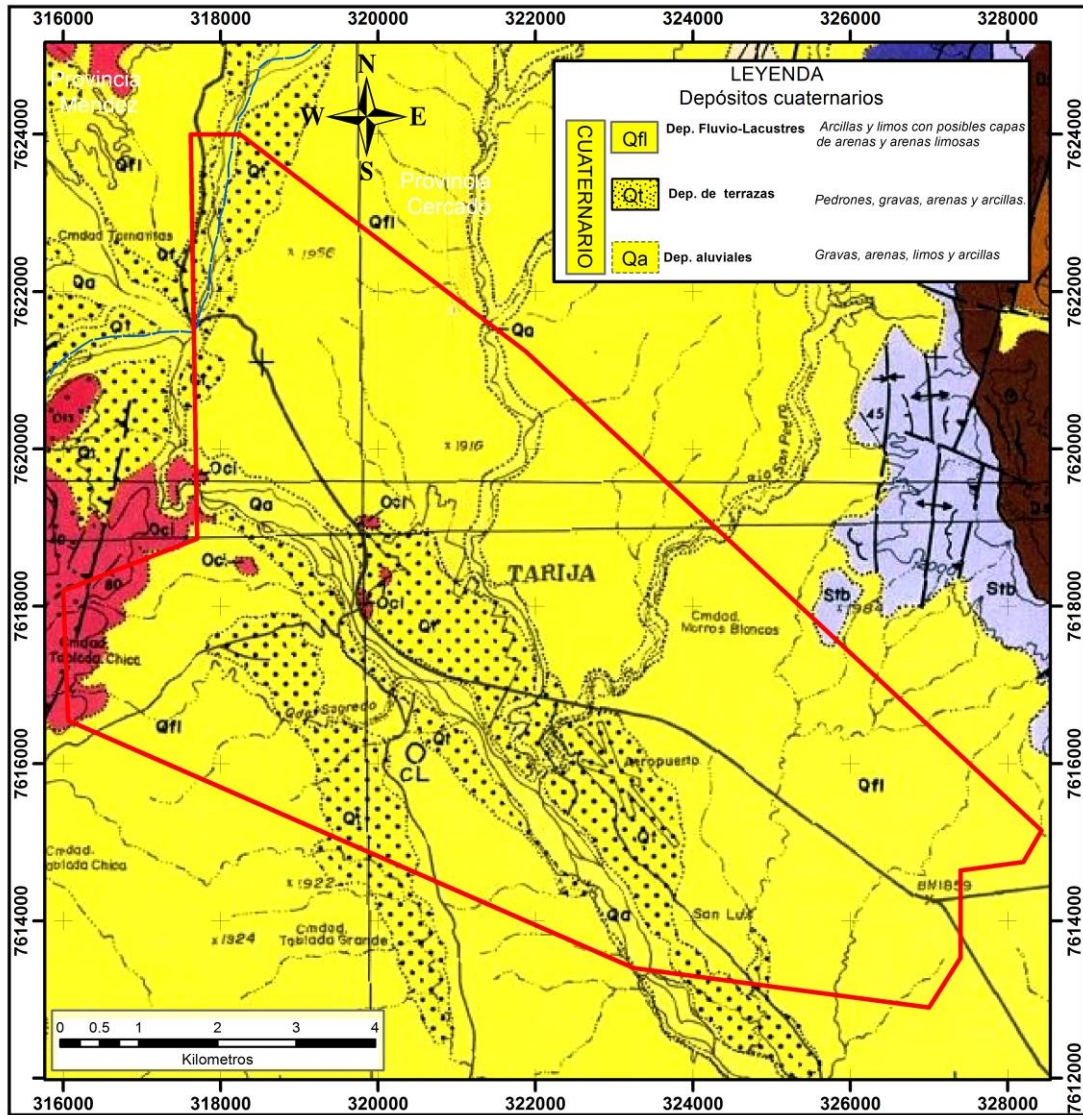
Debido a la erosión regresiva provocada por los cambios de nivel, provocados por estos movimientos, se produce el des agotamiento de estos lagos. En la figura 29, el color amarillo representa a los sedimentos fluviolacustres que forman los depósitos cuaternarios

Se distinguen los siguientes tipos de depósitos.

- **Depósitos fluviolacustres (Qfl).** - Es el depósito más significativo en el área de estudio por su extensión, están compuestas principalmente por limos arcillosos, arcilla con pequeñas intercalaciones lenticulares de arena y de niveles delgados y aislados de cinerita. Estos depósitos se encuentran encima de materiales aluviales, con horizontes de arena y grava de extensión y espesor apreciable que forman el acuífero principal de la zona.
- **Depósitos Aluviales (Qa).** - Están depositados principalmente, en las zonas de los ríos de suave pendiente y están compuestos principalmente por grava de tamaño variable, arcilla y limo, teniendo en las partes altas los materiales más gruesos y los finos en las partes más alejadas.



- **Depósitos de terrazas (Qt).** – Son depósitos producto de la depositación fluvial, están formado principalmente por grava y arena, y debido al rejuvenecimiento de los ríos forman terrazas aluviales que se encuentran a diferentes alturas, por lo tanto, las terrazas más altas son las más antiguas.





#### **3.3.4. Hidrogeología**

Existen pocos estudios a profundidad, referente a este tema, los únicos estudios hidrogeológicos de la cuenca del río Guadalquivir, proceden de un proyecto realizado por CODETAR Y NACIONES UNIDAS en 1979-1980, proyecto denominado “Investigación de aguas subterráneas en el valle central de Tarija” y del proyecto de diagnóstico “Plan Maestro Metropolitano de Agua y Saneamiento de Tarija” en el año 2012.

En el primer proyecto se perforo 28 pozos de exploración en diferentes partes de la cuenca. Estos pozos atravesaron solamente el acuífero multicapa que se encuentra en el material fluviolacustre no consolidado.

Este acuífero multicapa tiene la predominancia de materiales finos (arcillas y limos), existiendo variaciones faciales de tipo areno gravoso, la ubicación y profundidad de estas variaciones faciales dependen de la ubicación de las quebradas que aportaron el material para formarlas. Por esta razón la profundidad y el espesor de estos lentes de mayor granulometría son totalmente aleatorios. La mayoría de los pozos perforados existentes, explotan los acuíferos multicapa.

Posteriormente, se perforaron pozos a mayores profundidades y atravesaron el basamento de roca consolidada, encontrando un segundo tipo de acuífero propio de rocas consolidadas, este nuevo tipo de acuífero tiene características diferentes al acuífero multicapa explotado con anterioridad.

Estos pozos fueron diseñaron utilizando tanto los acuíferos multicapa de los sedimentos fluviolacustres, como los acuíferos en rocas porosas fracturas consolidadas

La profundidad del nivel de agua depende de las condiciones topográficas e hidrogeológicas. Los niveles del agua son profundos en las partes altas de la zona de estudio, alcanzando profundidades de 63 m (27 de mayo), 61 m (el constructor), 53 m (Morros Blancos), 52 m (1 de mayo), 76 m (Simón Bolívar Antiguo).

Sin embargo, en las partes más bajas, los niveles se encuentran cerca de la superficie o en todo caso son surgentes, 3 m (San Gerónimo), 2 m (San Luis).

La zona de recarga se encuentra fuera del área de estudio, en los bordes del relleno cuaternario donde la granulometría de los sedimentos es más gruesa y por lo tanto el terreno es favorable para la infiltración de aguas superficiales que son recolectadas por las sub-cuencas de las serranías circundantes.

Dentro del área de estudio, los depósitos de terrazas que se formaron a los bordes de los ríos y quebradas y el material aluvial acumulado en la llanura aluvial de estos ríos y quebradas, también, por sus características litológicas son áreas de recarga, aunque con menor infiltración.

Por las características de la zona de estudio, donde predominan los sedimentos finos limo arcillosos, no se encuentran demasiados puntos donde el acuífero descargué, sin embargo, al sur de la ciudad se localizan algunos puntos donde la descarga se produce naturalmente por algunos ojos de agua.

### **3.4. MATERIALES**

Los materiales y equipos utilizados para la obtención de la información de campo, procesamiento de datos en el presente trabajo de investigación son los siguientes:

Materiales y equipos de campo:

- Sonda eléctrica
- Cronometro
- Cámara fotográfica
- Planilla de registro
- Bolígrafo

Materiales y equipos de gabinete:

- Laptop corei5 DELL, RAM 4 GB, velocidad 2.20 GHz, 500 GB memoria.

- Impresora multifuncional Epson L365 sistema continuo
- Fotografías Digitalizadas
- Bibliografía necesaria
- Registro de datos de campo
- Materiales de escritorio (Papel bond, Memoria USB 16 GB, Tinta de Impresora, lapiceros, entre otros)

Software's utilizados:

- Arc Gis 10.5
- Arc Catalog 10.5
- Microsoft Office Word 2016
- Microsoft Office Excel 2016
- SURFER 14.0.
- Google earth

### **3.5. METODOLOGÍA**

#### ***3.5.1. Tipo de investigación***

Esta investigación es de tipo exploratoria, debido a que el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado antes. Los estudios exploratorios sirven para aumentar el grado de familiaridad con fenómenos relativamente desconocidos. Los estudios exploratorios en pocas ocasiones constituyen un fin en sí mismos, por lo general determinan tendencias, identifican relaciones potenciales entre variables y establecen el 'tono' de investigaciones posteriores más rigurosas.

#### ***3.5.2. Diseño de la investigación***

Esta investigación se considera no experimental de tipo mixta, es decir de campo y documental, ya que la recolección de datos se realizará una parte en campo, donde se recolectará información de descensos y la recuperación del pozo en las pruebas de bombeo, en cuanto a la ubicación de los pozos, y

niveles tanto en estado estático y dinámico, y otra parte de la información necesaria, se obtendrá de los datos proporcionados por COSAALT R.L.

### **3.5.3. Nivel de la investigación**

El Nivel de Investigación se refiere a “al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio” Arias (2006, p. 23). Según los objetivos del presente estudio, este se ubica en el nivel descriptivo, cuyo propósito es interpretar realidades de hecho. Incluye descripción, análisis e interpretación de la naturaleza actual, composición o procesos de los fenómenos. Siguiendo con Arias (2006, p. 24), esta señala “que este nivel de investigación consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno con el fin de establecer su estructura o comportamiento.

### **3.5.4. Población y muestra**

#### **3.5.4.1. Población**

Para el presente estudio se consideró como población al acuífero existente en la cuenca del río Guadalquivir.

#### **3.5.4.2. Muestra**

Para el presente trabajo de investigación se consideró como muestra, al conjunto de datos recopilados en el área de estudio, estos datos son considerados como muestreo aleatorio, los datos recopilados son la profundidad del nivel estático, Nivel dinámico, litología de los pozos, Ubicación de los pozos, descensos y ascensos en las pruebas de bombeo etc.

### **3.5.5. Técnicas e instrumentos**

#### **3.5.5.1. Técnicas**

La técnica a emplear para la interpretación de los ensayos de recuperación, será el método de recuperación de Jacob, además se utilizarán las herramientas y técnicas ofrecidas por el programa SURFER 14 para la interpolación de niveles piezométricos y, el Sistema de Información Geográfica como son ArcCatalog, ArcGis, esta última para generar los mapas

piezométricos, además del Excel para la interpretación de las pruebas de bombeo.

#### **3.5.5.2. Instrumentos**

Equipo de cómputo implementado con los softwares: Excel, ArcGis, ArcCatalog, SURFER 14.

#### **3.5.6. Metodología seguida**

La metodología seguida para dar cumplimiento a los objetivos planteados, este trabajo de investigación se desarrolla en tres fases, que comprenden los siguientes aspectos:

##### **3.5.6.1. FASE I: Fase exploratoria**

En esta fase se realizó la búsqueda de toda la información bibliográfica disponible para lograr una buena comprensión teórica del tema, esto con el objetivo de lograr una recolección correcta de los datos necesarios que permitieron la elaboración de mapas piezométricos y el cálculo de parámetros hidrogeológicos. Además, se recopiló información existente, tales como cartografía básica, estudios de las aguas subterráneas, estudios hidrogeológicos y geológicos realizados con anterioridad de la cuenca del río Guadalquivir.

También se recolectó toda información secundaria existente de todos los pozos de agua subterráneas que están en el área de estudio como ser: el inventario de pozos, niveles estáticos, niveles dinámicos, su ubicación, perfiles litológicos, caudales de bombeo, etc., esta información fue proporcionada por COSAALT R.L.

##### **3.5.6.2. FASE II: Ejecución de trabajos de campo**

En esta fase se procedió, a la realización de las pruebas de bombeo de caudal constante en régimen variable, procediendo a medir el nivel estático antes de comenzar el bombeo, registrando los niveles de descensos y tiempo, una vez iniciado el bombeo, para finalizar, una vez apagada la bomba se procedió al registro de los niveles en la recuperación del pozo.

Estas pruebas fueron realizadas bajo las limitaciones mencionadas en el capítulo 1 y en coordinación con COSAALT R.L.

Como resultado de esta actividad, se obtuvo un registro en planillas de las pruebas de bombeo, que contiene información de los descensos producidos por el bombeo y los ascensos producidos en la recuperación después de finalizado el bombeo.

### **3.5.6.3. FASE III: Evaluación y presentación de los resultados**

Una vez recolectada toda la información, se procedió con el análisis, tratamiento y depuración de la información no confiable, seguido de la evaluación e interpretación de la información confiable.

Se estudiaron los niveles estáticos proporcionados por COSAALT R.L. medidos en la gestión 2020 y 2021, los cuales fueron transformados en cotas piezométricas, con dicha data usando el programa Microsoft EXCEL 2016 se realizó una tabla de datos, La cual fue integrada al programa SURFER 14, para trazar las isopiezas mediante la técnica de interpolación geométrica que tiene el programa (Triangulation with linear Interpolation), obteniendo de manera rápida y sencilla las curvas de nivel (isopiezas) que definen las superficies piezométricas. Posteriormente, se realizó un análisis e interpretación de los mapas obtenidos.

Se aplicaron modelos matemáticos de estimación de parámetros hidrogeológicos, para estimar la Transmisividad y conductividad hidráulica, utilizando los datos de ascensos vs tiempo, obtenidos en el ensayo de recuperación.

Finalizado la evaluación de los datos, se procedió con la elaboración del informe o trabajo de grado y por último se realizará la sustentación o la presentación de los resultados.

## **CAPÍTULO 4**

### **ELABORACIÓN DE MAPAS PIEZOMÉTRICOS**

En el presente capítulo se describe la metodología desarrollada para la elaboración de los mapas piezométricos en el área de estudio.

#### **4.1. CRITERIOS GENERALES**

En la fase inicial de los trabajos, en la elaboración de los mapas piezométricos, se ha recopilado información referente a las características geológicas e hidrogeológicas y, informes de estudios hidrogeológicos que fueron desarrollados en el área de estudio.

La información que se ha utilizado para elaborar los mapas piezométricos procede principalmente de una base de datos con el registro de mediciones del nivel estático de las aguas subterráneas de cada mes, en la gestión 2020 y 2021, estas mediciones fueron realizadas por COSAALT R.L.

Solo es posible obtener valores del nivel piezométrico en un conjunto de puntos discretos de un acuífero (pozos, sondeos, manantiales) y a partir de ellos deben trazarse las curvas de nivel (isopiezas) que definen la superficie piezométrica.

Para el trazado de las isopiezas de un acuífero, se requiere que los valores del nivel piezométrico estén expresados en cotas absolutas (m.s.n.m.), pero lo que realmente se mide en los pozos y sondeos es la profundidad del agua desde un punto concreto del terreno o del borde de la entubación, para lo cual se debe transformar la profundidad en cota piezométrica (m.s.n.m.).

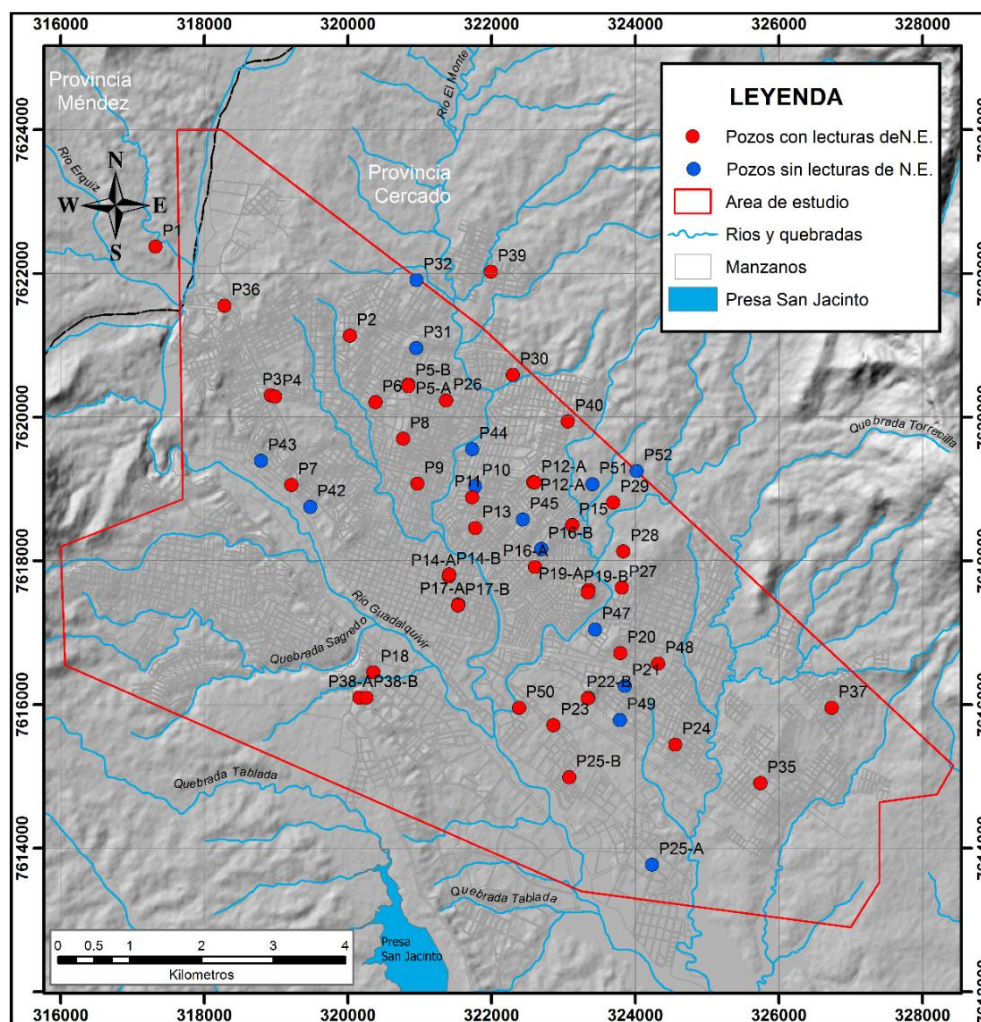
Para la elaboración de los mapas piezométricos se supondrá que el medio es homogéneo e isótropo y que el nivel vario gradualmente

#### **4.2. INVENTARIO DE POZOS**

Consiste en localizar los diversos puntos de fuentes subterráneas, que nos servirán como datos que necesitaremos para la elaboración de nuestros mapas. Los datos y mediciones recabados en este inventario son los siguientes: Nombre del propietario, situación geográfica, coordenadas y cota

del pozo, profundidad del nivel estático, profundidad del nivel dinámico, caudal de producción, tiempo de bombeo, características del pozo (profundidad, diámetro, longitud de filtros, columna litológica), etc.

Como se mencionó anteriormente, la principal fuente de información procede de la base de datos proporcionado por COSAALT R.L., que incluye el inventario de 57 pozos de aguas subterráneas (Ver Anexos A), de los cuales menos de 42 pozos disponen de medidas, al menos una medición en todo el año 2020 y 2021, algunos de estos pozos (8 pozos) que no son operables son usados como pozos de observación y constituyen una red básica de piezométrica.



**Figura 30** Pozos de agua subterránea bajo la concesión de COSAALT R.L.



La figura 30 muestra gráficamente la distribución de los 57 pozos inventariados por COSAALT R.L., que se establecen como referencia básica para la elaboración de los mapas piezométricos.

Como se observa en la figura anterior, la mayoría de los pozos están situados al margen derecho del río Guadalquivir y, por el contrario, en el margen izquierdo solo se disponen de 3 pozos que están muy cercanos, existiendo zonas donde no existe información.

#### **4.3. OBTENCIÓN DE LOS MAPAS PIEZOMÉTRICOS**

En este apartado se explicará la construcción de un solo mapa en específico, ya que el proceso para la construcción de los demás mapas piezométricos, es repetitivo.

Para la elaboración de los mapas piezométricos, se ha tomado como principal referencia la situación de los niveles del agua subterránea en agosto de 2021, los resultados de esta campaña se han considerado adecuados para representar la piezometría reciente y corresponde al mes, en el que se dispone la mayor cantidad de lecturas de nivel del agua, 42 pozos en total, de los 57 pozos del inventario, siendo este mes con mayor cantidad de datos.

##### **4.3.1. Transformación del nivel estático a cota piezométricas**

Todas las lecturas tomadas en campo, son indicativas del nivel estático (NE), datos que fueron transformados a cotas piezométricas absolutas (NP).



**Figura 31** Lectura del nivel estático tomada en campo

Para determinar el valor del nivel piezométrico correspondiente a cada pozo, expresada en metros sobre el nivel del mar, se procede a calcular con la ecuación (14), el nivel piezométrico se calcula por la diferencia entre el valor de la cota del terreno ( $Z$ ) y el valor de la medida de la profundidad del agua ( $NE$ ) descontando la altura de entubación ( $ADEME$ ), con respecto del borde de entubación a la superficie del terreno (Ver Fig. 32).

$$NP = Z - (NE - ADEME) \quad (14)$$

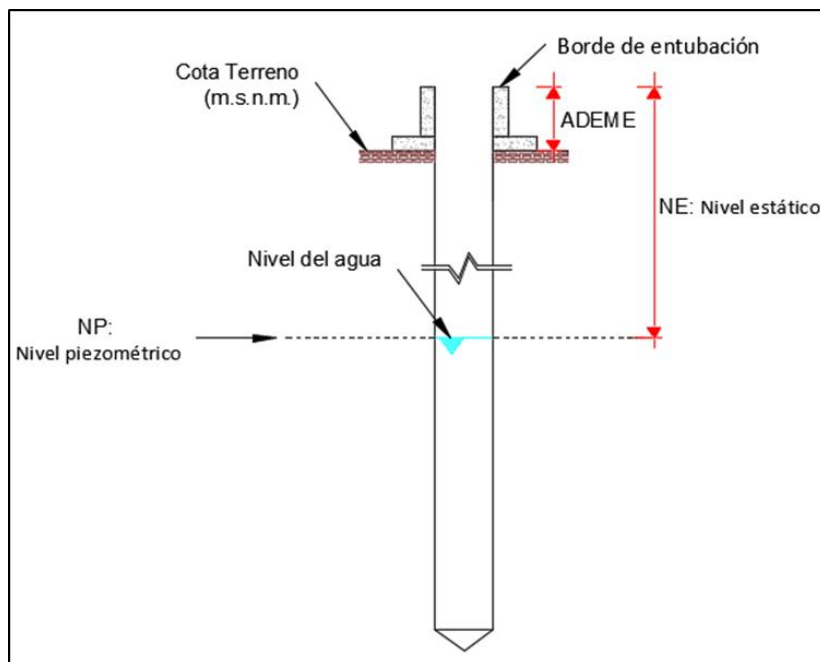
Donde:

**NP** = Nivel piezométrico (*m.s.n.m.*)

**NE** = Nivel estático (*m*)

**Z** = Cota terreno (*m.s.n.m.*)

**ADEME** = altura desde el borde de entubación a la superficie del terreno (*m*)



**Figura 32** Esquema para la transformación del N.E. a Nivel piezométrico

En la tabla 8 se presenta la información disponible de cada pozo y cotas de nivel piezométricos resultantes del procedimiento descrito anteriormente,

para el mes de agosto de 2021, datos que fueron utilizados para la elaboración del mapa piezométrico.

**Tabla 8** Características de los pozos seleccionados para la elaboración del mapa piezométrico

Nº	DENOMINATIVO DEL POZO	CÓDIGO TÉCNICO	Coordenadas WGS 84 UTM z 20 s		COTA TERRENO z m.s.n.m.	ADEME (m)	AGOSTO (2021)	
			X	Y			NE (m)	NP (m.s.n.m.)
1	Daniel Campos	P9	320968	7619078	1892	0.58	31.2	1861.38
2	Villa Busch	P18	320356	7616449	1867	0.15	16.9	1850.25
3	Stadium (Pozo Antiguo)	P14-A	321405	7617786	1869	0.61	20	1849.61
4	Stadium (Pozo Nuevo)	P14-B	321412	7617812	1869	0.7	26.56	1843.14
5	Circunvalación "A" (Jardinera afuera)	P3	318928	7620305	1923	0.03	36.35	1886.68
6	Circunvalación "B" (Con bomba y tanque elevado)	P4	318987	7620288	1922	0.14	27.9	1894.24
7	Narciso Campero (Pozo antiguo)	P16-A	322605	7617918	1883	0.6	34.6	1849
8	San Luis (kiosco y tapón)	P25-B	323082	7614988	1844	0.75	2.75	1842
9	Base Aérea	P23	322864	7615715	1856	0.5	9.43	1847.07
10	San Gerónimo (PN)	P50	322383	7615956	1851	0.5	3.3	1848.2
11	Villa Fátima Pozo "A"	P17-A	321536	7617395	1866	0.77	16.8	1849.97
12	Villa Fátima Pozo "B"	P17-B	321533	7617383	1866	0.72	17.3	1849.42
13	San Jacinto B1	P38-A	320161	7616097	1907	0.77	75.9	1831.87
14	San Jacinto B2	P38-B	320257	7616099	1903	0.76	62.2	1841.56
15	Guadalquivir	P7	319212	7619061	1882	0.95	16.3	1866.65
16	Tomatas C	P1	317323	7622376	1943	0.46	14.5	1928.96
17	Los Álamos	P36	318282	7621555	1945	0.1	27.3	1917.8
18	Avit Pozo A	P5-A	320844	7620460	1916	0.69	42	1874.69
19	Avit Pozo B	P5-B	320841	7620434	1916	0.79	30.3	1886.49
20	Albat	P8	320768	7619703	1910	0.6	38	1872.6
21	Lourdes	P26	321369	7620237	1897	0.8	35.3	1862.5
22	San Bernardo "A"	P11	321731	7618888	1892	0.66	41.6	1851.06
23	El Constructor "A"	P12-A	322581	7619098	1909	0.55	60.6	1848.95
24	El Constructor "B"	P12-A	322598	7619093	1909	1.2	61.41	1848.79

Nº	DENOMINATIVO DEL POZO	CÓDIGO TÉCNICO	Coordenadas WGS 84 UTM z 20 s		COTA TERRENO z m.s.n.m.	ADEME (m)	AGOSTO (2021)	
			X	Y			NE (m)	NP (m.s.n.m.)
25	Pedro Antonio Flores (Pozo Antiguo)	P13	321775	7618460	1885	0.4	36.4	1849
26	Luis Espinal A	P15	323122	7618500	1902	0.8	50	1852.8
27	Luis Espinal B	P29	323692	7618817	1903	0.45	52.2	1851.25
28	Morros Blancos "A"	P19-A	323349	7617598	1898	0.65	54.2	1844.45
29	Morros Blancos "B"	P19-B	323340	7617560	1900	0.6	53.1	1847.5
30	Aeropuerto "A"	P22-A	323340	7616086	1870	0.7	34.8	1835.9
31	Anaspugio "A"	P27	323813	7617630	1888	0.5	42.6	1845.9
32	Anaspugio "B"	P28	323836	7618134	1896	0.35	54.8	1841.55
33	Simón Bolívar (Pozo Antiguo)	P20	323793	7616719	1885	0.78	76	1809.78
34	Oscar Zamora M.	P2	320030	7621136	1929	0.38	12.7	1916.68
35	3 de mayo	P6	320385	7620210	1906	0.42	26	1880.42
36	27 de Mayo	P40	323064	7619945	1919	0.7	63.5	1856.2
37	Valle Hermoso	P39	321990	7622028	1910	0.73	37.5	1873.23
38	1ro de Mayo	P30	322297	7620592	1904	0.5	52.9	1851.6
39	San Salvador	P35	325742	7614909	1868	0.85	33.1	1835.75
40	Simón Bolívar II (PN)	P48	324319	7616571	1865	0.5	36.3	1829.2
41	Vela (Torrecillas)	P37	326737	7615956	1880	0.6	76.8	1803.8
42	San Jorge II	P24	324557	7615444	1864	0.15	26.2	1837.95

#### **4.3.2. Información hidrogeológica complementaria**

En la elaboración de los mapas piezométricos se han tenido en cuenta, además de los datos descritos anteriormente, diversas lecturas de la profundidad del nivel de agua y referencias hidrogeológicas de apoyo, extraídos del proyecto: BOL./78/006 "Investigación de aguas subterráneas en el valle central de Tarija" desarrollado por CODETAR y NACIONES UNIDAS, en los años 1979-1980, además de otros informes disponibles.

Esto con la finalidad de ampliar la cobertura del mapa en el área de estudio y reducir la incertidumbre en el trazado de las isopiezas, en las zonas donde no se cuenta con información.

**Tabla 9** Datos de niveles estáticos complementarios

N°	CODIGO	NOMBRE	Coordenadas WGS 84 UTM z 20 s		COTA TERRENO	N.E.	N.P.
			X	Y	Z (m.s.n.m.)	(m)	(m.s.n.m.)
1	T1	Las barrancas	319420.9	7620277.01	1916	12.75	1903.25
2	T4	Monte sud	321507	7624206	1930	1.78	1928.22
3	T5	Quebrada La aguada	323366.61	7622688.93	1951	30.5	1920.5
4	T6	San Mateo	319093.94	7623779.84	1956	21.9	1934.1
5	T22	Monte Cercado	320814.19	7627028.56	1983	29.5	1953.5
6	T12	San Luis	324408.34	7614241.84	1849	-9	1858
7	T14	El Portillo	327871.32	7613264.15	1847	1.5	1845.5
8	T18	Tablada	320954.78	7614326.92	1903	24.67	1878.33
9	T9	Portillo	328711.41	7612719.46	1834	4	1830
10	T24	Tabladita	319274.48	7615353.98	1904	23	1881
11	T26	Tolomosa	315122.77	7608539.86	1941	7.15	1933.85
12	T17	Calama	314452.64	7631878.53	2092	14.8	2077.2
13	T-15		316499.91	7631686.45	2052	7.8	2044.2

Fuente: Obtenido de Investigación de aguas subterráneas en el valle central de Tarija, por CODETAR y NACIONES UNIDAS (1979-1980).

#### 4.3.3. Trazado de las líneas Isopiezas

Previo al trazado, es importante aclarar, que los pozos utilizados como una red de monitoreo no se encuentran debidamente, niveladas y georreferenciadas, con respecto al nivel del mar (m.s.n.m.), por lo que, las coordenadas y cotas de nivel de cada pozo, fueron extraídos de Google Earth.

Una vez analizada toda la información disponible de pozos con lecturas de nivel estático y descartando para cada mes los pozos con datos faltantes (Tabla 8), se trazaron las isopiezas mediante interpolación geométrica.

Para este trabajo fueron utilizados dos programas: SURFER 14.0, que fue implementado para el modelado del flujo del agua subterránea, este programa permite la creación de isoclinas y modelado de superficies en base a interpolación geométrica de datos XYZ.

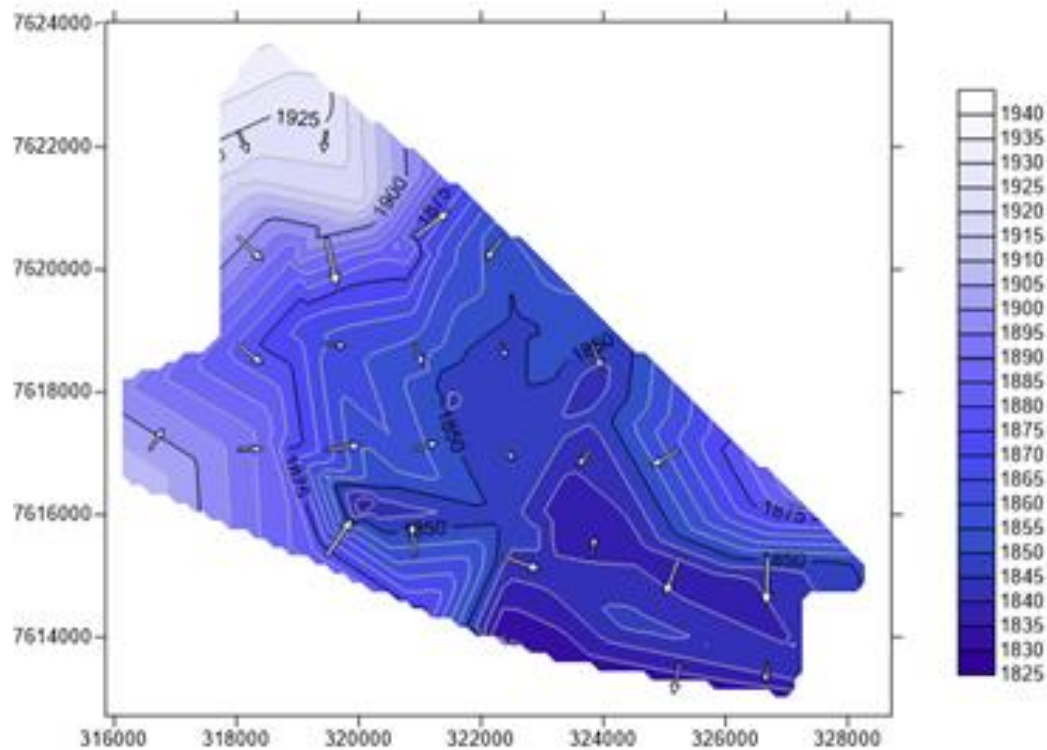
La tabla 8 fue integrada al programa SURFER 14.0, mediante un archivo Excel y la técnica de interpolación usada fue: Triangulation With Linear

Interpolation (Interpolación Lineal con Triangulación), obteniendo las curvas de nivel (isopiezas) correspondientes al mes de agosto 2021, otra ventaja del programa es que, permite analizar la dirección del flujo del agua subterránea.

En la figura 33, se presentan las curvas de nivel (isopiezas) resultantes de la interpolación SURFER 14, asimismo, se presentan las direcciones de flujo del agua subterránea para el mes de agosto del 2021.

Una vez realizada la interpolación, las isopiezas fueron exportadas a un archivo shapefile (.shp) para poder integrarla al ArcGis.

Una segunda parte del estudio fue realizada con ArcGis 10.5 (ArcMap) que se utilizó para el suavizado de las curvas de nivel (isopiezas) haciendo uso de la herramienta smooth line integrada en la caja de herramientas de ArcToolbox y posterior rasterización, esto con el fin de realizar algebra de mapas y poder comparar las variaciones espacio-temporales de la piezométrica. Además del diseño de la presentación de los mapas e impresión.



**Figura 33** Curvas de isopiezas y dirección de flujo Agosto 2021, (SURFER 14)

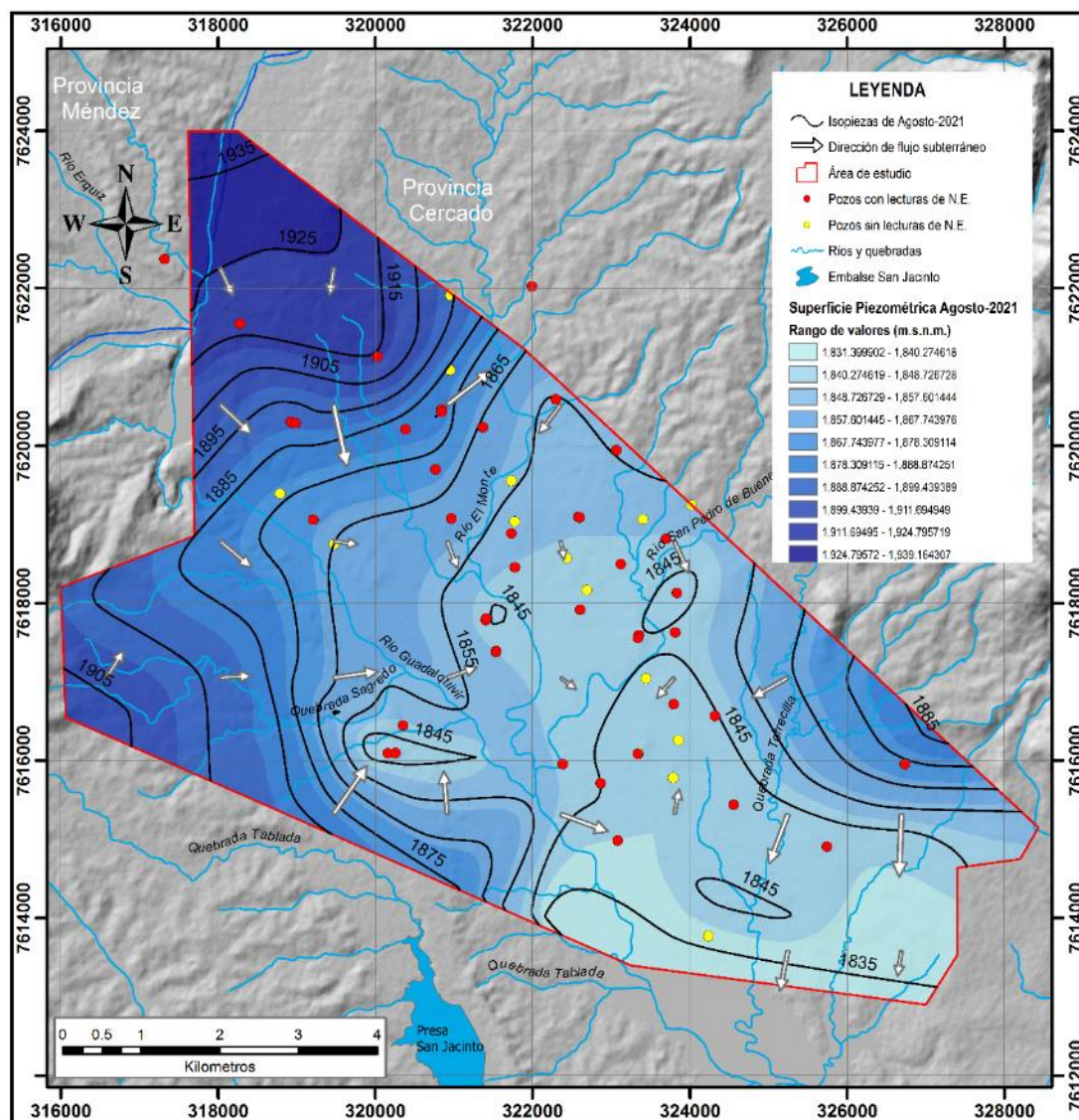


Figura 34 Mapa piezométrico Agosto-2021

Como se mencionó anteriormente, esta misma metodología fue aplicada, en la construcción de los mapas piezométricos para los meses restantes de la gestión 2020 y 2021, cuyos resultados se presentan en anexos B.

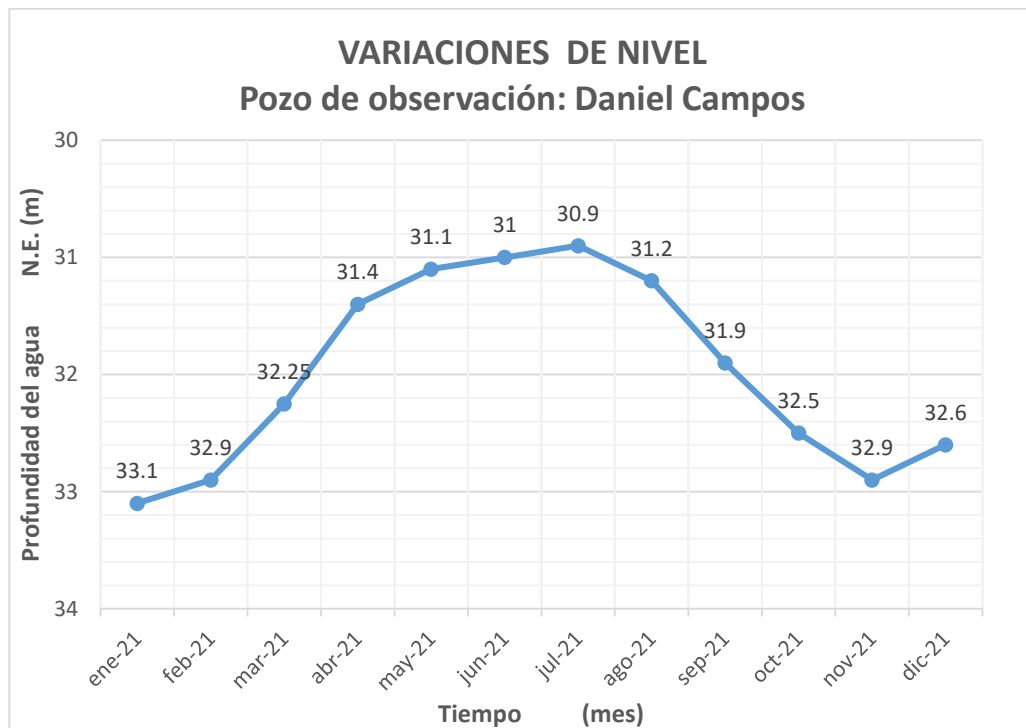
#### 4.4. HIDROGRAMAS

Aunque las bases técnicas del trabajo de investigación, tenga como objetivo general, solo la confección de los mapas piezométricos, en este



trabajo se presenta otra forma de procesamiento de los datos que pueden contribuir poderosamente a una mejor interpretación de la situación en estudio.

Un hidrograma, es un gráfico que muestra las variaciones de almacenamiento del agua subterránea, relacionando la forma de profundidad (o altura) del nivel freático o piezométrico, versus el tiempo (Fig. 35).

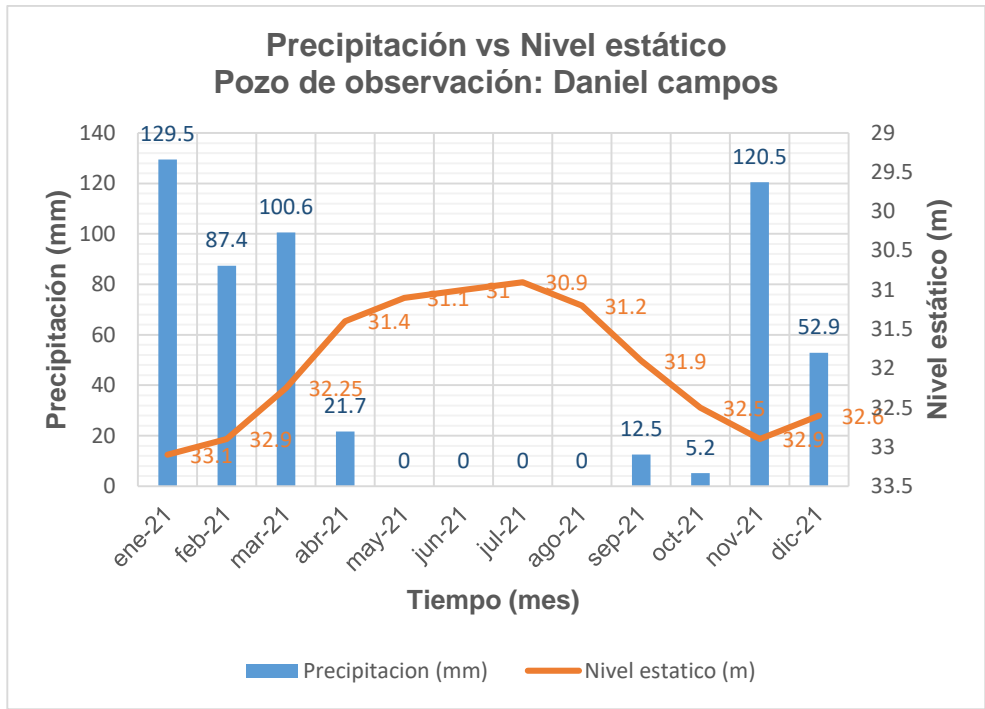


**Figura 35** Hidrograma de variación de nivel, pozo de observación Daniel Campos

En la figura 36, podemos observar que la recarga del acuífero tiene un desfase con respecto al periodo de lluvias, ya que el máximo almacenamiento se registra en los meses de junio, julio y agosto, meses en época de estiaje, y el almacenamiento mínimo del acuífero se registra en los meses de noviembre, diciembre y enero, meses en época de lluvias.

Es decir que, en los meses de lluvia, el nivel estático se encuentra más profundo y en los meses de estiaje se encuentra a menos profundidad, más cerca de la superficie terrestre.





**Figura 36** Variación del nivel estático con respecto a la precipitación

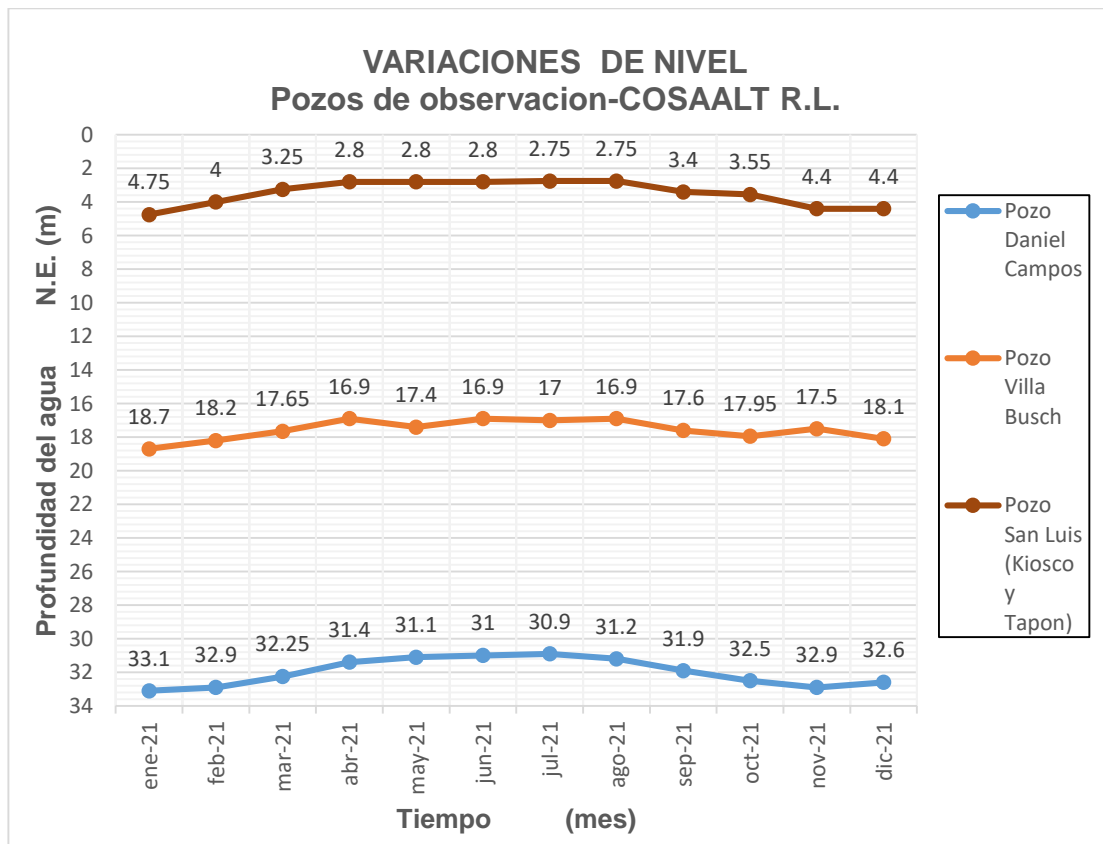


**Figura 37** Hidrograma de variación de nivel, Pozo Circunvalación B

En el hidrograma de la figura 37, correspondiente al pozo Circunvalación B, podemos observar que existen cambios de nivel bruscos, esto puede obedecer a dos fenómenos principales, a cambios de almacenamiento del agua subterránea y a cambios debido a la presión atmosférica en el caso de acuíferos libres.

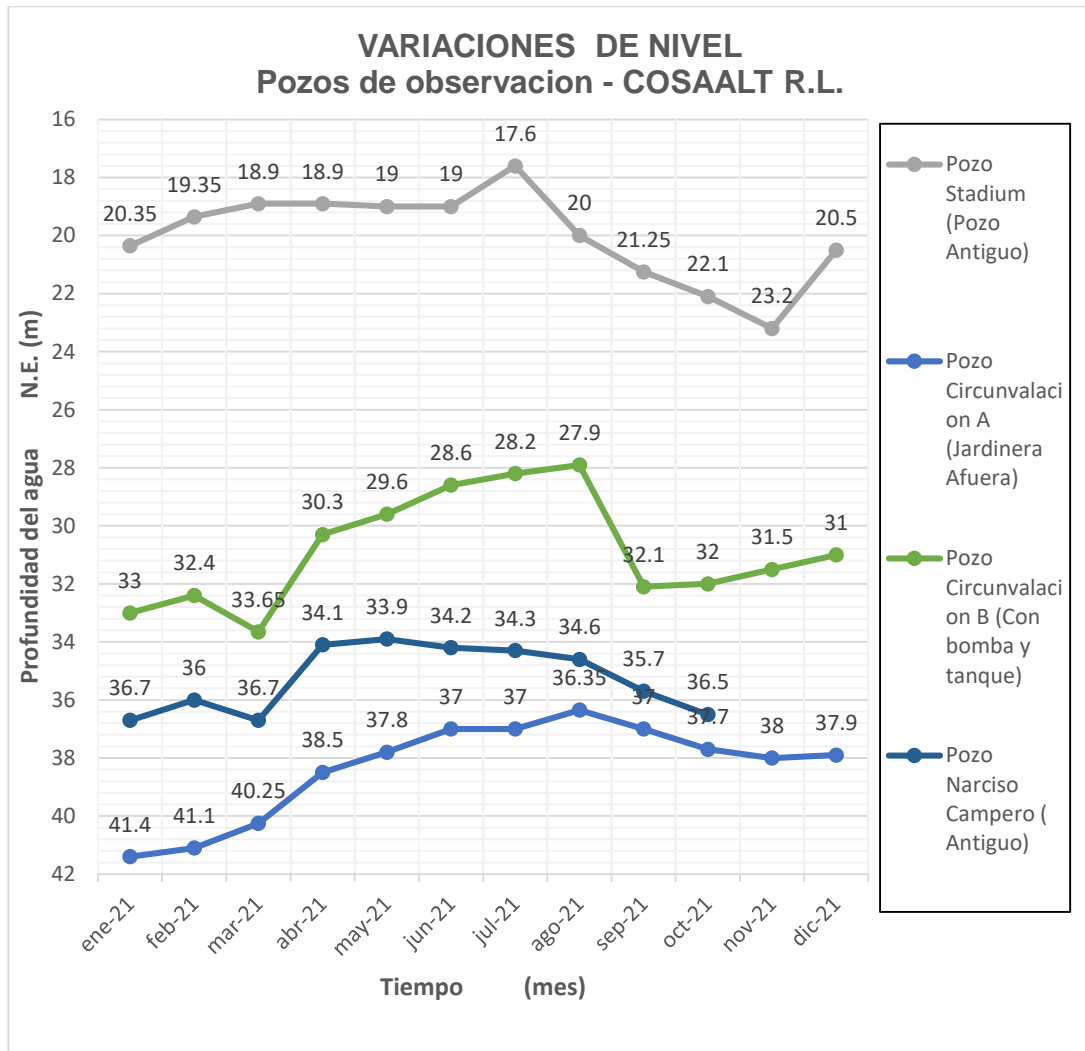
Generalmente, estos cambios ocurren debido a los cambios de almacenamiento del agua subterránea, los elementos más comunes que provocan este cambio son la precipitación, el bombeo desde pozos y las filtraciones desde ríos.

También existe la posibilidad, de que estos cambios bruscos ocurran debido a la sobre explotación del acuífero o al bombeo de pozos subterráneos que estén muy cerca al pozo analizado, estos pozos pueden ser privados o en todo caso, puede ser evidencia de la existencia de pozos clandestinos.



**Figura 38** Pozos de observación con el mismo comportamiento

En el hidrograma de la figura 38, se presenta la clasificación de los pozos de observación que tienen el mismo comportamiento y en general no presentan cambios bruscos.



**Figura 39** Pozos de observación con el mismo comportamiento (variaciones bruscas)

En la figura 39, se presentan los pozos de observación que han sufrido cambios bruscos de nivel de agua subterránea, por lo que se concluye, que existen dos zonas, en el que, el acuífero se comporta de la misma manera.

## CAPÍTULO 5

### PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

En el presente capítulo se describe la metodología aplicada para la determinación de los parámetros hidrogeológicos, con datos obtenidos de la prueba de recuperación, en cada pozo donde se realizó la prueba de Bombeo.

#### 5.1. LOCALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS

En total se realizaron 18 pruebas de bombeo y recuperación, cuya localización se presenta en la figura 40.

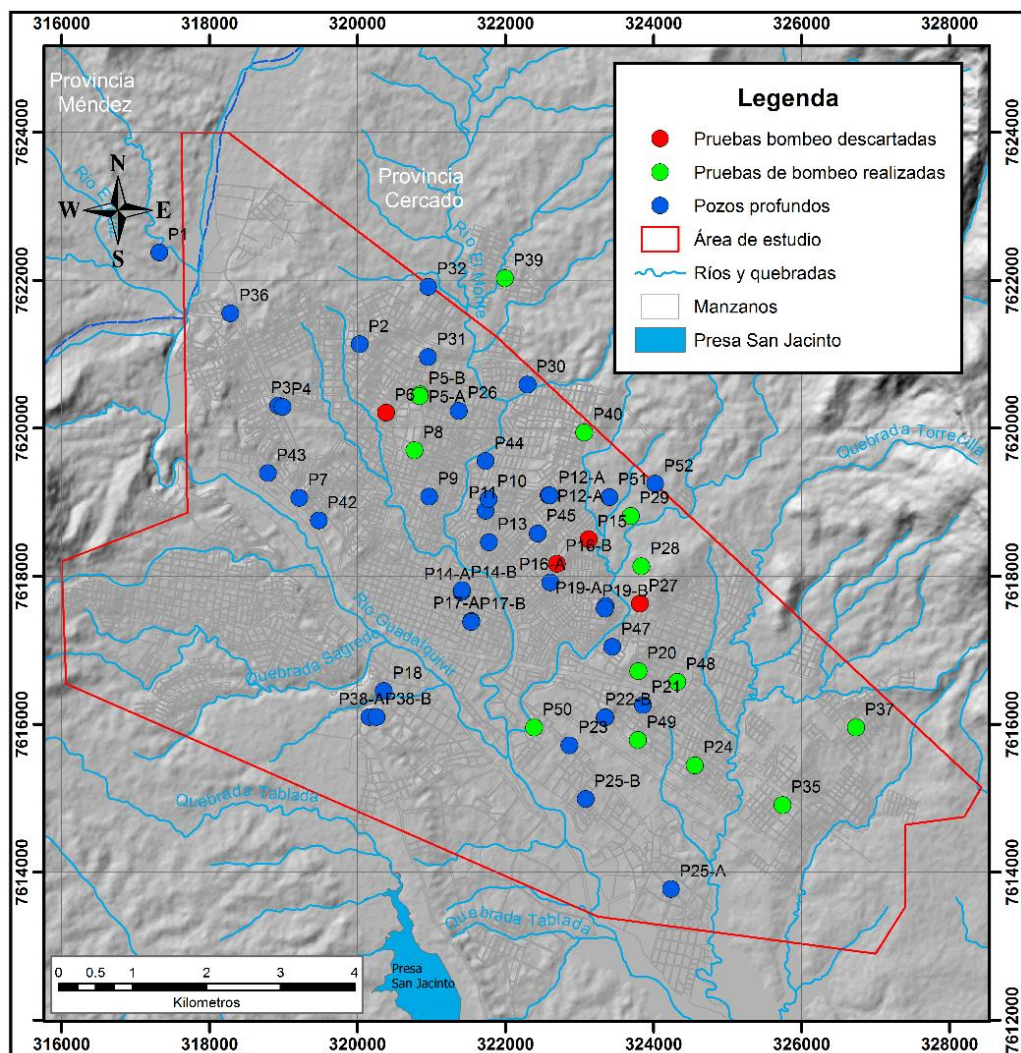


Figura 40 Pruebas de bombeo realizadas

De todas estas pruebas, se descartaron 4 pruebas (Anaspugio A, Luis Espinal A, Narciso Campero PN y 3 de mayo) por datos no confiables, obteniendo malos resultados en el análisis e interpretación de cada prueba.

## **5.2. MÉTODO UTILIZADO PARA LA INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE BOMBEO**

Se debe aclarar que, para determinar los parámetros hidrogeológicos mediante pruebas de bombeo, se requiere contar de por lo menos, con un pozo de observación, lo cual en nuestro caso no se cumple debido a que todos los pozos de COSAALT no cuentan con pozos de observación.

Por tal motivo, se realizó el análisis e interpretación de los datos obtenidos en la prueba de recuperación, que es un tipo de prueba en la que se mide como recupera el cono de descensos su nivel piezométrico estático, tras un bombeo continuo. En esta prueba se interpreta la evolución de los ascensos (-d) o descenso residual ( $d_R$ ), en el tiempo hasta la casi recuperación del nivel estático original del acuífero, a partir de la parada.

La prueba se realiza midiendo en el mismo pozo de bombeo y solo se determina la transmisividad

En este caso, se trabajó con el método analítico conocido como Jacob (Cooper y Jacob, 1946) aplicado a la recuperación para acuíferos confinados y en algunos casos para semiconfinados, tomando en cuenta el tiempo para el cual la linealidad se cumple, para determinar gráficamente y numéricamente la validez de este método.

## **5.3. PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS**

### ***5.3.1. Prueba de bombeo: Pozo 27 de mayo***

Esta prueba se realizó mediante registro de niveles en el mismo pozo de bombeo, debido a que no se cuenta con pozo de observación.

Desafortunadamente se tuvo que ajustar la prueba de bombeo, de acuerdo a los horarios de funcionamiento establecidos por COSAALT R.L., esto con el fin de no perjudicar la dotación de agua potable a los barrios

pertenecientes al sistema, para así evitar posteriores reclamos de los vecinos hacia COSAALT.



**Figura 41** Pozo 27 de mayo

**Tabla 10** Horarios de funcionamiento, pozo 27 de mayo

	<b>Hora de encendido</b>	<b>Hora de apagado</b>
1er Periodo	05:00 am	09:00 a.m.
2do Periodo	14:00 pm	18:00 p.m.

Fuente: COSAALT R.L.

De acuerdo a los horarios de funcionamiento, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación después del apagado de la bomba (09:00a.m.), previamente se registró el nivel dinámico (N.D.= 67.78 m).

En este pozo no fue posible medir el caudal de bombeo, debido a que se requería abrir la válvula de salida, interrumpiendo el llenado del tanque de agua, provocando el desabastecimiento de agua a los barrios. Por lo que el caudal usado para la interpretación fue proporcionado por COSAALT R.L.

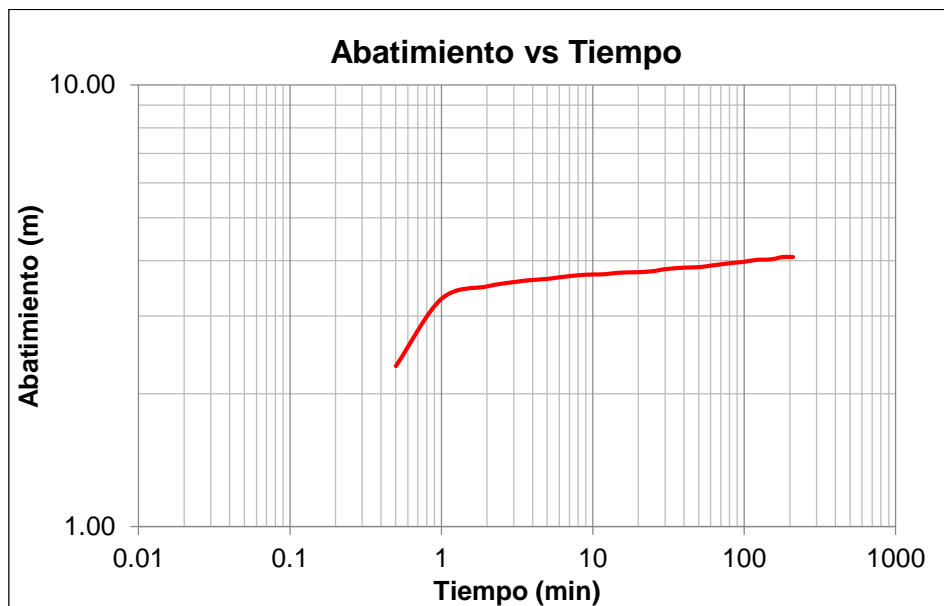


**Figura 42** Medición del nivel dinámico, Pozo 27 de mayo

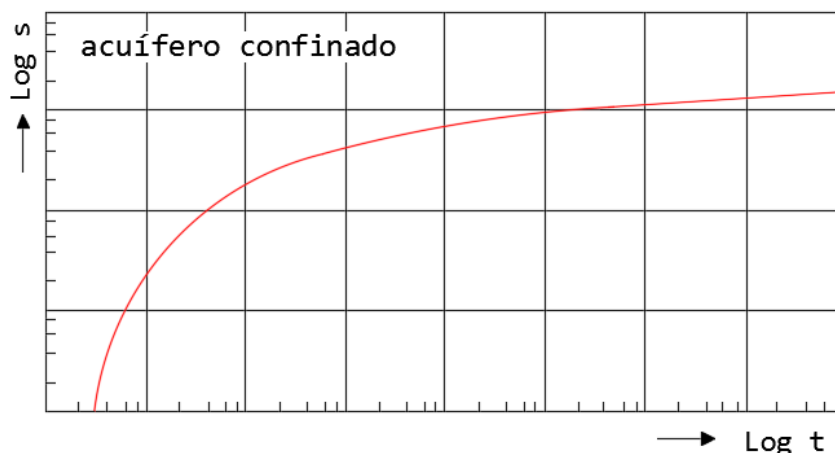
Los datos resultantes de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

#### **5.3.1.1. Interpretación de la prueba de bombeo**

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento vs Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 43** Curva abatimiento vs tiempo, pozo 27 de mayo



**Figura 44** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero Confinado.

### 5.3.1.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo 27 de mayo.

**Tabla 11** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo 27 de mayo

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	27 de Mayo	<b>Profundidad del pozo:</b>	156 m
<b>Nivel Estático inicial:</b>	63.7 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	80 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	67.78 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	6 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	3.63 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	30 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	240 min	<b>Litología del Acuífero:</b>	Grava fina + arena



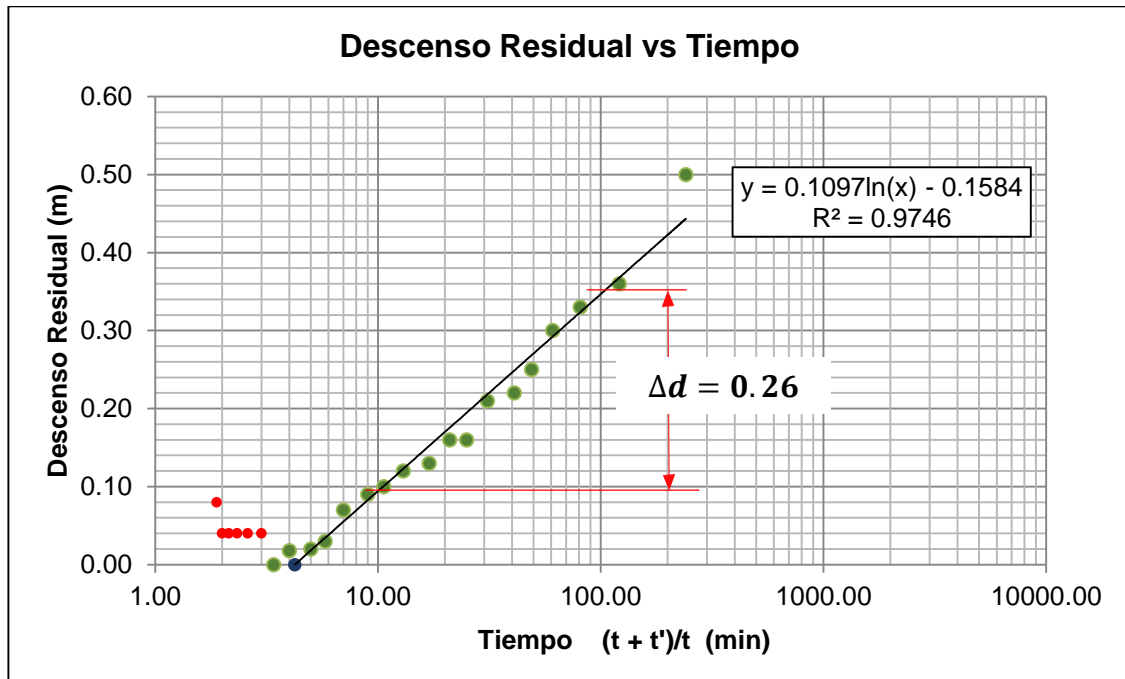
**Tabla 12** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN					
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t´	t + t´	(t + t´)/t´	Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (d <sub>R</sub> )
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	63.70		240	0	240	0.00	67.47	3.77
0.5	66.01	2.31	240.5	0.5	240.5	481.00	65.1	1.40
1	66.98	3.28	241	1	241	241.00	64.2	0.50
2	67.20	3.50	242	2	242	121.00	64.06	0.36
3	67.28	3.58	243	3	243	81.00	64.03	0.33
4	67.32	3.62	244	4	244	61.00	64.00	0.30
5	67.34	3.64	245	5	245	49.00	63.95	0.25
6	67.37	3.67	246	6	246	41.00	63.92	0.22
8	67.41	3.71	248	8	248	31.00	63.91	0.21
10	67.43	3.72	250	10	250	25.00	63.86	0.16
12	67.43	3.73	252	12	252	21.00	63.86	0.16
15	67.46	3.76	255	15	255	17.00	63.83	0.13
20	67.47	3.77	260	20	260	13.00	63.82	0.12
25	67.49	3.79	265	25	265	10.60	63.8	0.10
30	67.53	3.83	270	30	270	9.00	63.79	0.09
40	67.56	3.86	280	40	280	7.00	63.77	0.07
50	67.57	3.87	290	50	290	5.80	63.73	0.03
60	67.60	3.90	300	60	300	5.00	63.72	0.02
80	67.65	3.95	320	80	320	4.00	63.718	0.02
100	67.68	3.98	340	100	340	3.40	63.7	0.00
120	67.72	4.02	360	120	360	3.00	63.74	0.04
150	67.73	4.03	390	150	390	2.60	63.74	0.04
180	67.78	4.08	420	180	420	2.33	63.74	0.04
210	67.78	4.08	450	210	450	2.14	63.74	0.04
240			480	240	480	2.00	63.74	0.04
270			510	270	510	1.89	63.78	0.08

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por

tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.



**Figura 45** Recta de recuperación, pozo 27 de mayo

### 5.3.1.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación, se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 45. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(3.63 \text{ l/s} * 86.4)}{0.26 \text{ m}}$$

$$T = 220.75 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 13, vemos que el pozo 27 de mayo se encuentra en un acuífero de media a alta capacidad para ceder agua, con caudales entre 10 a 50 l/s.

**Tabla 13** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

#### 5.3.1.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad *T* y el espesor del acuífero *b*.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{220.75 \text{ m}^2/\text{día}}{30 \text{ m}}$$

$$K = 7.36 \text{ m/día}$$

**Tabla 14** Valores de la permeabilidad

<b>K (m/día)</b>	<b>Calificación estimada</b>
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

Comparando el resultado con la tabla 14, vemos que el pozo 27 de mayo tiene una calificación estimativa de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

### **5.3.2. Prueba de bombeo: Pozo Valle Hermoso**



**Figura 46** Pozo Valle Hermoso

Esta prueba se realizó mediante registro de niveles en el mismo pozo de bombeo, debido a que no se cuenta con pozo de observación.

Al igual que la anterior prueba, se tuvo que ajustar la prueba de bombeo, de acuerdo a los horarios de funcionamiento establecidos por COSAALT R.L., esto con el fin de no perjudicar la dotación de agua potable a los barrios

pertenecientes al sistema, para así evitar posteriores reclamos de los vecinos hacia COSAALT.

**Tabla 15** Horarios de funcionamiento pozo Valle Hermoso

	Hora de encendido	Hora de apagado
1er Periodo	03:00 am	09:00 a.m.
2do Periodo	15:00 pm	21:00 p.m.

Fuente: COSAALT R.L.

De acuerdo a los horarios de funcionamiento, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación durante el apagado de la bomba (09:00a.m.), previo al apagado de la bomba se registró el nivel dinámico (N.D.=55.05 m).



**Figura 47** Medición del nivel dinámico, pozo Valle Hermoso

Al igual que el anterior pozo, no fue posible medir el caudal de bombeo, debido a que se requería abrir la válvula de salida, interrumpiendo el llenado del tanque de agua, provocando el desabastecimiento de agua a los barrios. Por lo que el caudal usado para la interpretación fue proporcionado por COSAALT R.L.

Los datos resultantes de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

### 5.3.2.1. Interpretación de la prueba de bombeo

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.

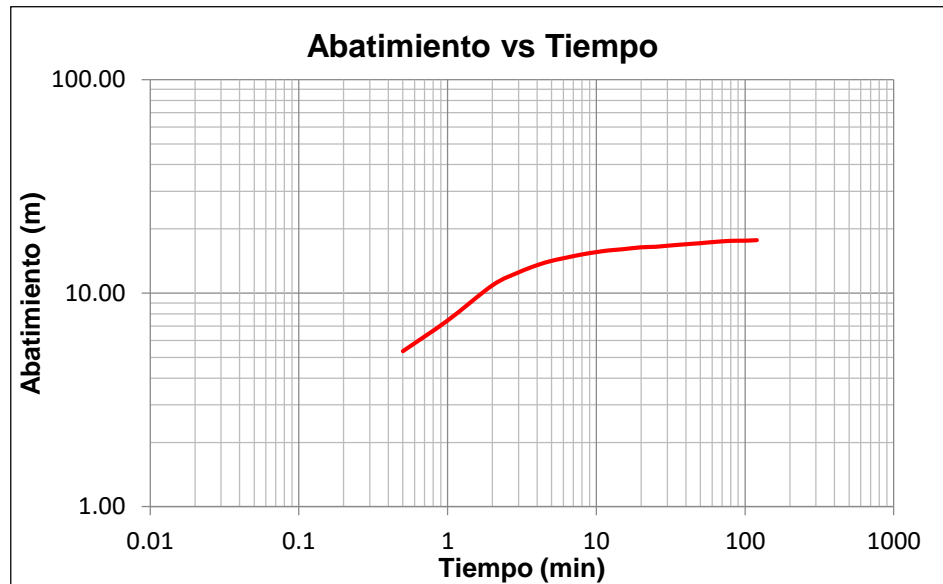


Figura 48 Curva abatimiento vs tiempo, pozo Valle Hermoso

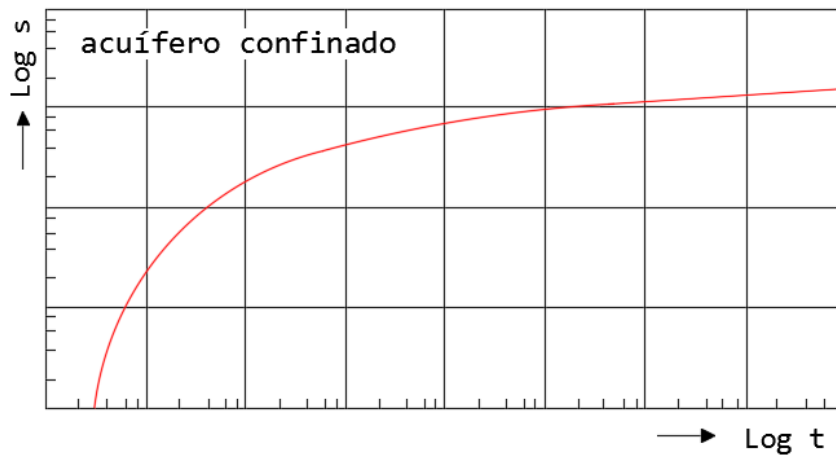


Figura 49 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero Confinado.

### 5.3.2.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo Valle Hermoso.

**Tabla 16** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo Valle Hermoso

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	Valle Hermoso	<b>Profundidad del pozo:</b>	128.5 m
<b>Nivel Estático inicial:</b>	36.95 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	80 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	55.05 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	6 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	4.12 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	22 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	420 min	<b>Litología:</b>	Gravilla + arena gruesa

**Tabla 17** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

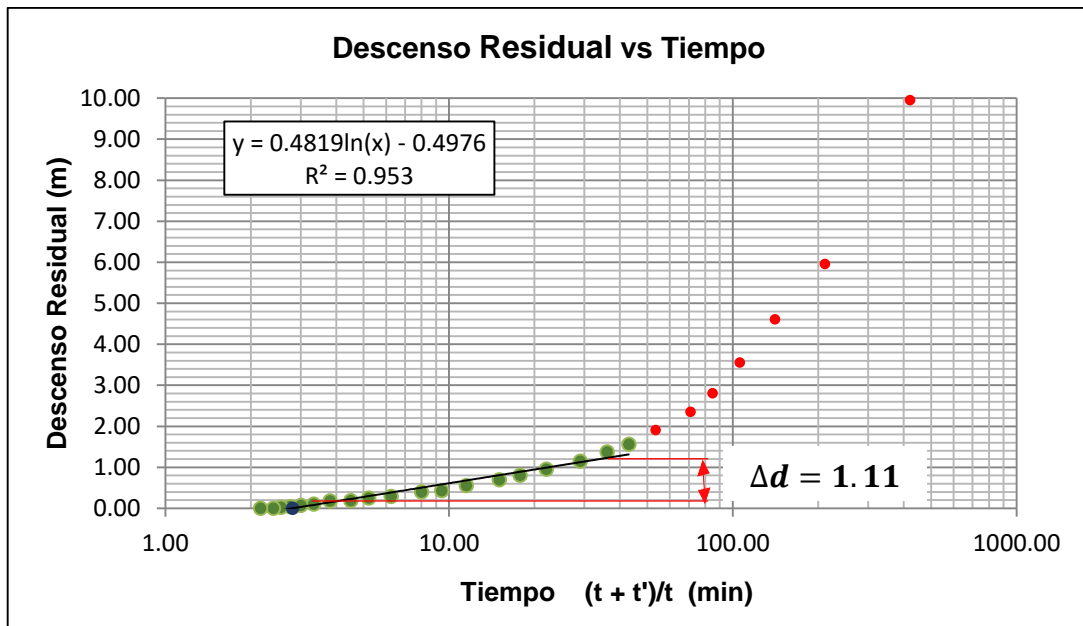
BOMBEO				RECUPERACIÓN				
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t'	t + t'	(t + t')/t'	Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (d <sub>R</sub> )
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	36.95		420	0	420	0.00	55.05	18.10
0.5	42.30	5.35	420.5	0.5	420.5	841.00	49.2	12.25
1	44.40	7.45	421	1	421	421.00	46.9	9.95
2	47.82	10.87	422	2	422	211.00	42.9	5.95
3	49.45	12.50	423	3	423	141.00	41.55	4.60
4	50.46	13.51	424	4	424	106.00	40.50	3.55
5	51.10	14.15	425	5	425	85.00	39.75	2.80
6	51.50	14.55	426	6	426	71.00	39.3	2.35
8	52.11	15.16	428	8	428	53.50	38.85	1.90

BOMBEO			RECUPERACIÓN					
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t'	t + t'	(t + t')/t'	Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (d <sub>R</sub> )
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
10	52.49	15.54	430	10	430	43.00	38.51	1.56
12	52.77	15.82	432	12	432	36.00	38.32	1.37
15	52.98	16.03	435	15	435	29.00	38.1	1.15
20	53.32	16.37	440	20	440	22.00	37.9	0.95
25	53.41	16.46	445	25	445	17.80	37.75	0.80
30	53.60	16.65	450	30	450	15.00	37.64	0.69
40	53.87	16.92	460	40	460	11.50	37.5	0.55
50	54.06	17.11	470	50	470	9.40	37.38	0.43
60	54.26	17.31	480	60	480	8.00	37.35	0.40
80	54.50	17.55	500	80	500	6.25	37.24	0.29
100	54.53	17.58	520	100	520	5.20	37.2	0.25
120	54.63	17.68	540	120	540	4.50	37.14	0.19
150			570	150	570	3.80	37.13	0.18
180			600	180	600	3.33	37.05	0.10
210			630	210	630	3.00	37.02	0.07
240			660	240	660	2.75	36.99	0.04
270			690	270	690	2.56	36.97	0.02
300			720	300	720	2.40	36.95	0.00
360			780	360	780	2.17	36.95	0.00

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.





**Figura 50** Recta de recuperación, pozo Valle Hermoso

### 5.3.2.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 50. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(4.12 \text{ l/s} * 86.4)}{1.11 \text{ m}}$$

$$T = 58.69 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido con los valores de la Tabla 18, Vemos que el pozo Valle Hermoso se encuentra en un acuífero de baja capacidad para ceder agua, con caudales entre 1 a 10 l/s.

**Tabla 18** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.2.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{58.69 \text{ m}^2/\text{día}}{22 \text{ m}}$$

$$K = 2.67 \text{ m/día}$$

**Tabla 19** Valores de la permeabilidad

K (m/día)	Calificación estimada
K < 10 <sup>-2</sup>	Muy baja
10 <sup>-2</sup> < K < 1	Baja
1 < K < 10	Media
10 < K < 100	Alta
K > 100	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

Comparando el resultado con la tabla 19, vemos que el pozo Valle Hermoso, tiene una calificación estimativa de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno

### **5.3.3. Prueba de bombeo: Pozo San Jorge II**



**Figura 51** Pozo de agua San Jorge II

Esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación.

A diferencia de las pruebas anteriores, en esta prueba se pudo bombear en la primera fase, seguida por una segunda fase de recuperación, debido a que no estaba en funcionamiento. En coordinación con el operador y en base a su disponibilidad de tiempo, se programó para registrar inicialmente el bombeo con el encendido de la bomba a horas 10:00 a.m., previo al encendido se registró el nivel estático (N.E.=27 m).

En este pozo si se pudo aforar el caudal, debido a que contaba con válvulas de salida y cámara de desagüe, para eso, se utilizó un balde y con la ayuda de un cronómetro se registró el tiempo de llenado, el caudal se lo determino por el método volumétrico ( $Q_b= 2.61$  l/s).



**Figura 52** Medición del nivel estático, pozo San Jorge II

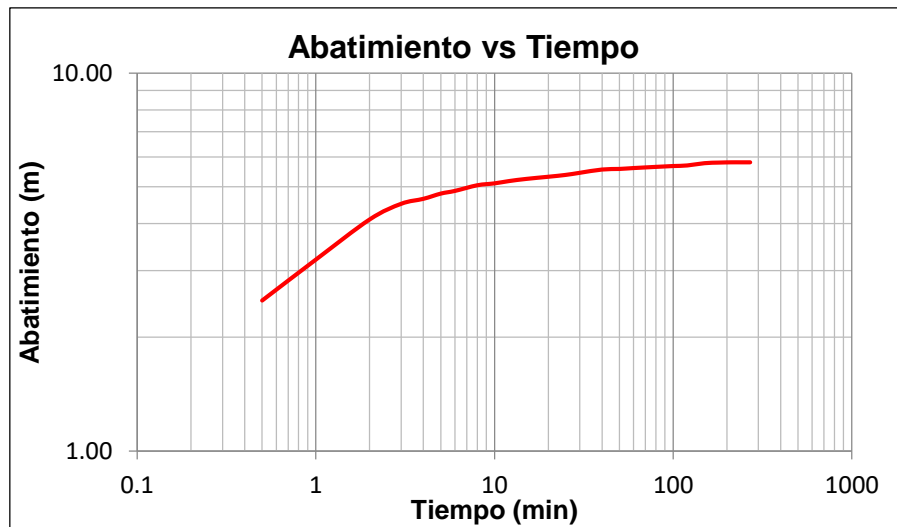


**Figura 53** Aforo del caudal, pozo San Jorge II

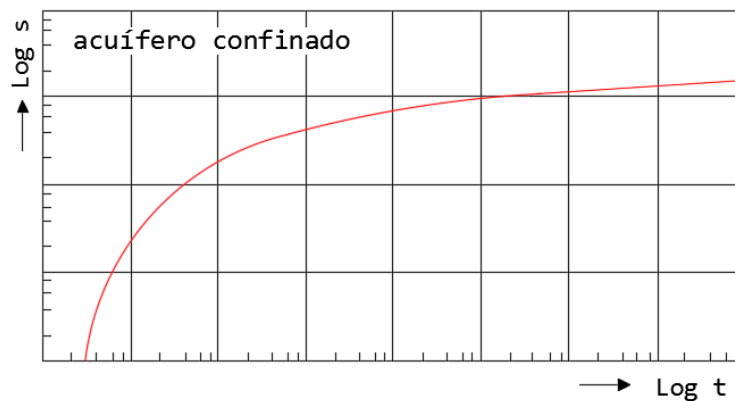
Lo resultados de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

### **5.3.3.1. Interpretación de la prueba de bombeo**

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 54** Curva abatimiento vs tiempo, pozo San Jorge II



**Figura 55** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero Confinado.

### 5.3.3.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob. A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo San Jorge II.

**Tabla 20** Características técnicas en la prueba de bombeo, pozo San Jorge II

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	San Jorge II	<b>Profundidad del pozo:</b>	145.13 m
<b>Nivel Estático:</b>	27.7 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	82.5 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	33.51 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	8 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	2.64 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	25.5 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	270 min	<b>Litología:</b>	Grava Arenosa

**Tabla 21** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO				RECUPERACIÓN				
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t'	t + t'	(t + t')/t'	Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (d <sub>R</sub> )
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	27.70		270	0	270	0.00	33.51	5.81
0.5	30.20	2.50	270.5	0.5	270.5	541.00	31.45	3.75
1	30.91	3.21	271	1	271	271.00	30.1	2.40
2	31.80	4.10	272	2	272	136.00	29.69	1.99
3	32.21	4.51	273	3	273	91.00	29.48	1.78
4	32.35	4.65	274	4	274	68.50	29.30	1.60
5	32.50	4.80	275	5	275	55.00	29.1	1.40
6	32.58	4.88	276	6	276	46.00	28.95	1.25
8	32.75	5.05	278	8	278	34.75	28.72	1.02
10	32.81	5.11	280	10	280	28.00	28.55	0.85
12	32.88	5.18	282	12	282	23.50	28.46	0.76
15	32.95	5.25	285	15	285	19.00	28.37	0.67
20	33.02	5.32	290	20	290	14.50	28.3	0.60
25	33.08	5.38	295	25	295	11.80	28.25	0.55
30	33.15	5.45	300	30	300	10.00	28.22	0.52
40	33.26	5.56	310	40	310	7.75	28.15	0.45
50	33.28	5.58	320	50	320	6.40	28.12	0.42
60	33.31	5.61	330	60	330	5.50	28.1	0.40
80	33.35	5.65	350	80	350	4.38	28.07	0.37
100	33.38	5.68	370	100	370	3.70	28.03	0.33
120	33.40	5.70	390	120	390	3.25	28	0.30
150	33.48	5.78	420	150	420	2.80	27.98	0.28
180	33.50	5.80	450	180	450	2.50	27.96	0.26
210	33.51	5.81						

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso (m)	Descenso residual ( $d_R$ ) (m)
Tiempo (min)	Nivel Dinámico (m)	Abatimiento (m)	tg (min)	$t'$ (min)	$t + t'$ (min)	$(t + t')/t'$ (min)		
240	33.51	5.81						
270	33.51	5.81						

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

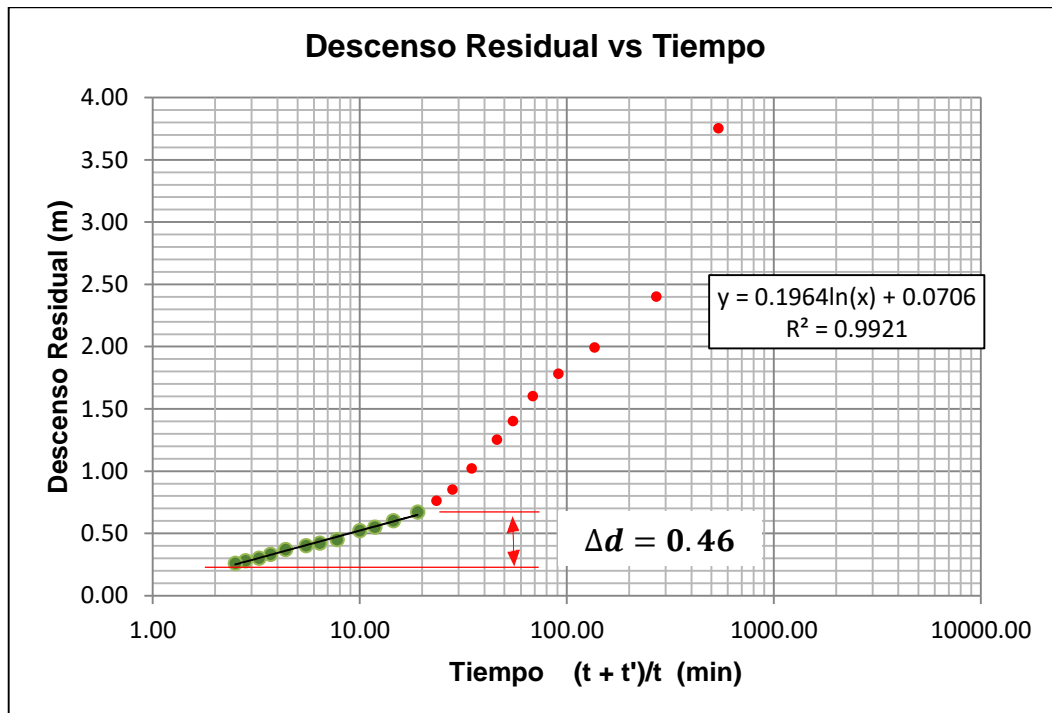


Figura 56 Recta de recuperación, pozo San Jorge II

### 5.3.3.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 56. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día. En este caso el caudal esta en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(2.64 \text{ l/s} * 86.4)}{0.46 \text{ m}}$$

$$T = 90.74 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 22, vemos que el pozo San Jorge II se encuentra en un acuífero de baja capacidad para ceder agua, con caudales entre 1 a 10 l/s.

**Tabla 22** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.



### 5.3.3.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{90.74 \text{ m}^2/\text{día}}{25.5 \text{ m}}$$

$$K = 3.56 \text{ m/día}$$

**Tabla 23** Valores de la permeabilidad

K (m/día)	Calificación estimada
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

Comparando el resultado con la tabla 23, vemos que el pozo San Jorge II, tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

### 5.3.4. Prueba de bombeo: pozo Simón Bolívar (PN)

Esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación.



**Figura 57** Pozo Simón Bolívar (PN)

Al igual que en la anterior, en esta prueba se pudo bombear en la primera fase, seguida por una segunda fase de recuperación, debido a que no estaba en funcionamiento. En coordinación con el operador y en base a su disponibilidad de tiempo, se programó para registrar inicialmente el bombeo con el encendido de la bomba a horas 09:00 a.m., previo al encendido se registró el nivel estático (N.E.=26.92 m).



**Figura 58** Medición de los descensos, pozo Simón Bolívar (PN)

Al igual que, en el anterior pozo, en este pozo si se pudo aforar el caudal, debido a que contaba con válvulas de salida y cámara de desagüe, para eso, se utilizó la cámara de desagüe como un recipiente de volumen conocido y con la ayuda de un cronometro se registró el tiempo de llenado, el caudal se lo determino por el método volumétrico ( $Q_b = 10.92 \text{ l/s}$ ), valor muy cercano al proporcionado por COSAALT ( $Q = 11 \text{ l/s}$ ).

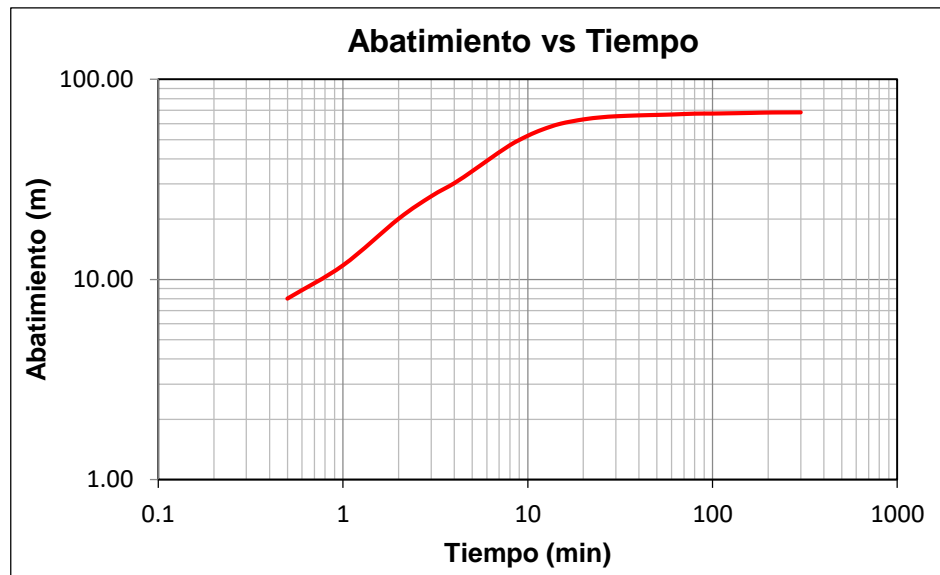


**Figura 59** Aforo del caudal, Pozo Simón Bolívar (PN)

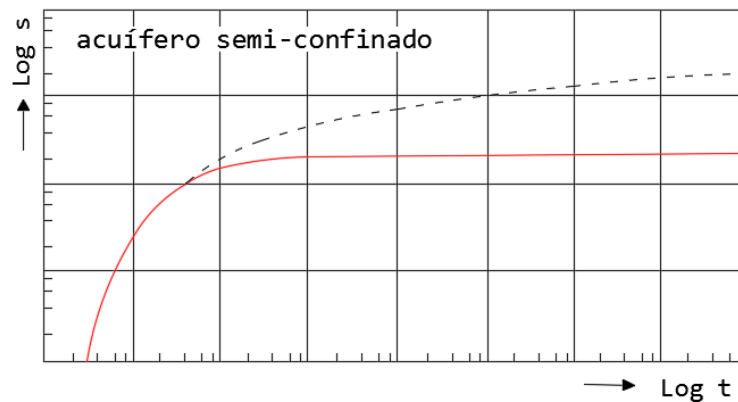
Lo datos registrados en esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

#### **5.3.4.1. Interpretación de la prueba de bombeo**

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 60** Curva abatimiento vs tiempo, pozo Simón Bolívar (PN)



**Figura 61** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero semiconfinado

Fuente: Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero Semiconfinado.

#### 5.3.4.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob. A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el

periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo Simón Bolívar (PN).

**Tabla 24** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo Simón Bolívar (PN)

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	Simón Bolívar (PN)	<b>Profundidad del pozo:</b>	133 m
<b>Nivel Estático inicial:</b>	26.92 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	58.75 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	95.43 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	8 Pulg.
<b>Caudal de Bombeo:</b>	10.92 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	25.9 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	300 min	<b>Litología:</b>	Grava + Arena

**Tabla 25** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO				RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual ( $d_R$ )
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	$t'$	$t + t'$	$(t + t')/t'$			
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)	
0	26.92		300	0	300	0.00	95.43	68.51	
0.5	34.95	8.03	300.5	0.5	300.5	601.00	92.1	65.18	
1	38.70	11.78	301	1	301	301.00	88.3	61.38	
2	47.05	20.13	302	2	302	151.00	81.88	54.96	
3	52.98	26.06	303	3	303	101.00	75.92	49.00	
4	57.23	30.31	304	4	304	76.00	70.55	43.63	
5	61.71	34.79	305	5	305	61.00	65.88	38.96	
6	66.08	39.16	306	6	306	51.00	61.4	34.48	
8	73.85	46.93	308	8	308	38.50	54.2	27.28	
10	79.25	52.33	310	10	310	31.00	47.9	20.98	
12	83.13	56.21	312	12	312	26.00	42.45	15.53	
15	87.00	60.08	315	15	315	21.00	36.3	9.38	
20	90.10	63.18	320	20	320	16.00	32.4	5.48	
25	91.62	64.70	325	25	325	13.00	31.21	4.29	
30	92.41	65.49	330	30	330	11.00	30.65	3.73	
40	93.09	66.17	340	40	340	8.50	30.07	3.15	
50	93.45	66.53	350	50	350	7.00	29.66	2.74	
60	93.75	66.83	360	60	360	6.00	29.45	2.53	
80	94.40	67.48	380	80	380	4.75	29.04	2.12	
100	94.49	67.57	400	100	400	4.00	28.79	1.87	

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual ( $d_R$ )
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	$t'$	$t + t'$	$(t + t')/t'$		
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
120	94.68	67.76	420	120	420	3.50	28.56	1.64
150	94.90	67.98	450	150	450	3.00	28.32	1.40
180	95.15	68.23	480	180	480	2.67	28.15	1.23
210	95.32	68.40						
240	95.36	68.44						
300	95.43	68.51						

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

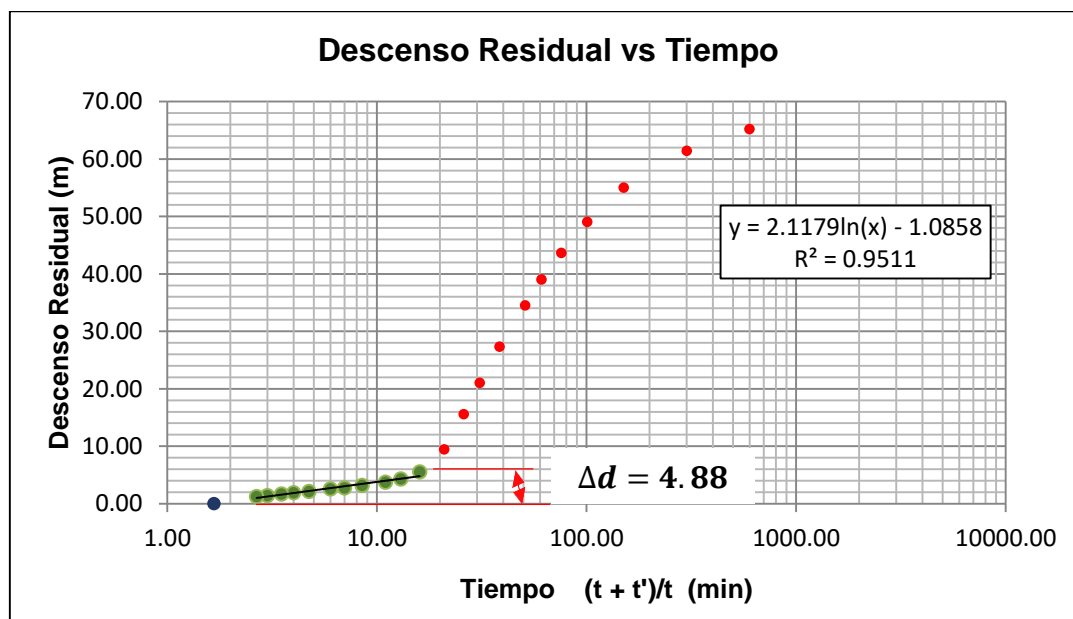


Figura 62 Recta de recuperación, pozo Simón Bolívar (PN)

### 5.3.4.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 62. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día. En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(10.92 \text{ l/s} * 86.4)}{4.88 \text{ m}}$$

$$T = 35.38 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 26, vemos que el pozo Simón Bolívar (PN) se encuentra en un acuífero de baja capacidad para ceder agua, con caudales entre 1 a 10 l/s.

**Tabla 26** Valores de la Transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.4.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{35.38 \text{ m}^2/\text{día}}{25.9 \text{ m}}$$

$$K = 1.37 \text{ m/día}$$

**Tabla 27** Valores de la permeabilidad

K (m/día)	Calificación estimada
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

Comparando el resultado con la tabla 27, vemos que el pozo Simón Bolívar (PN), tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

### 5.3.5. Prueba de bombeo: Pozo Vela (Torrecillas)

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación.





**Figura 63** Pozo Vela (Torrecillas)

En esta prueba también se pudo bombear en la primera fase, seguida por una segunda fase de recuperación, debido a la disponibilidad de poder modificar el horario de funcionamiento y en coordinación con el operador, se programó para registrar inicialmente el bombeo con el encendido de la bomba a horas 9:00 a.m., previamente se registró el nivel estático (N.E.=40.90 m) antes de comenzar con el bombeo.



**Figura 64** Medición del nivel estático, pozo Vela (Torrecillas)

En este pozo no se pudo aforar el caudal, debido a que el medidor de caudal que tenía instalado no funcionaba y la tubería de desagüe se

encontraba clausurado. Por lo que el caudal ( $Q_b=4.5$  l/s) usado para la interpretación fue proporcionado por COSAALT R.L.

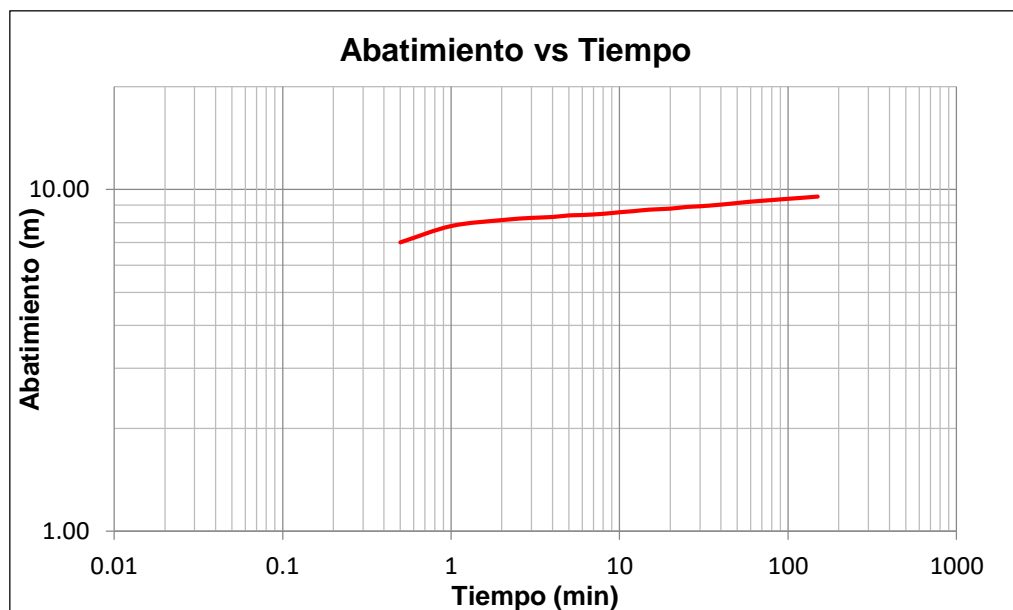


**Figura 65** Medidor de caudal dañado

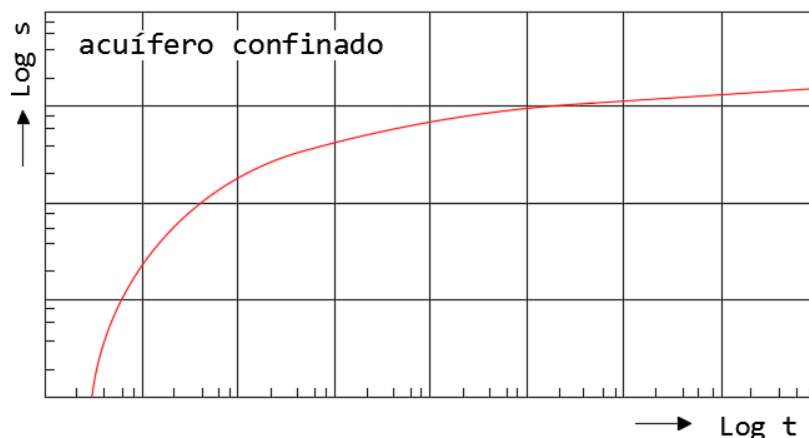
Lo resultados de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

### 5.3.5.1. Interpretación de la prueba de bombeo

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 66** Curva abatimiento vs tiempo, pozo Vela. (Torrecillas)



**Figura 67** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero confinado.

### 5.3.5.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo Vela (Torrecillas).

**Tabla 28** Características técnicas en la prueba de bombeo, pozo Vela (Torrecillas)

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	Vela (Torrecillas)	<b>Profundidad del pozo:</b>	162 m
<b>Nivel Estático:</b>	40.9 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	94 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	50.42 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	8 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	4.5 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	14 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	150 min	<b>Litología:</b>	Gravilla+ Arena

**Tabla 29** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (DR)
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t'	t + t'	(t + t')/t'		
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	40.90		150	0	150	0.00	50.42	9.52
0.5	47.90	7.00	150.5	0.5	150.5	301.00	43.3	2.40
1	48.71	7.81	151	1	151	151.00	42.68	1.78
2	49.03	8.13	152	2	152	76.00	42.26	1.36
3	49.15	8.25	153	3	153	51.00	42.16	1.26
4	49.20	8.30	154	4	154	38.50	42.06	1.16
5	49.29	8.39	155	5	155	31.00	41.99	1.09
6	49.31	8.41	156	6	156	26.00	41.93	1.03
8	49.38	8.48	158	8	158	19.75	41.87	0.97
10	49.47	8.57	160	10	160	16.00	41.82	0.92
12	49.53	8.63	162	12	162	13.50	41.79	0.89
15	49.62	8.72	165	15	165	11.00	41.74	0.84
20	49.68	8.78	170	20	170	8.50	41.67	0.77
25	49.78	8.88	175	25	175	7.00	41.57	0.67
30	49.82	8.92	180	30	180	6.00	41.5	0.60
40	49.92	9.02	190	40	190	4.75	41.47	0.57
50	50.02	9.12	200	50	200	4.00	41.44	0.54
60	50.10	9.20	210	60	210	3.50	41.4	0.50
80	50.20	9.30	230	80	230	2.88	41.33	0.43
100	50.28	9.38	250	100	250	2.50	41.27	0.37
120	50.34	9.44	270	120	270	2.25	41.25	0.35
150	50.42	9.52	300	150	300	2.00	41.22	0.32
180			330	180	330	1.83	41.18	0.28
210			360	210	360	1.71	41.13	0.23
240			390	240	390	1.63	41.1	0.20
300			450	300	450	1.50	41.05	0.15

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por

tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

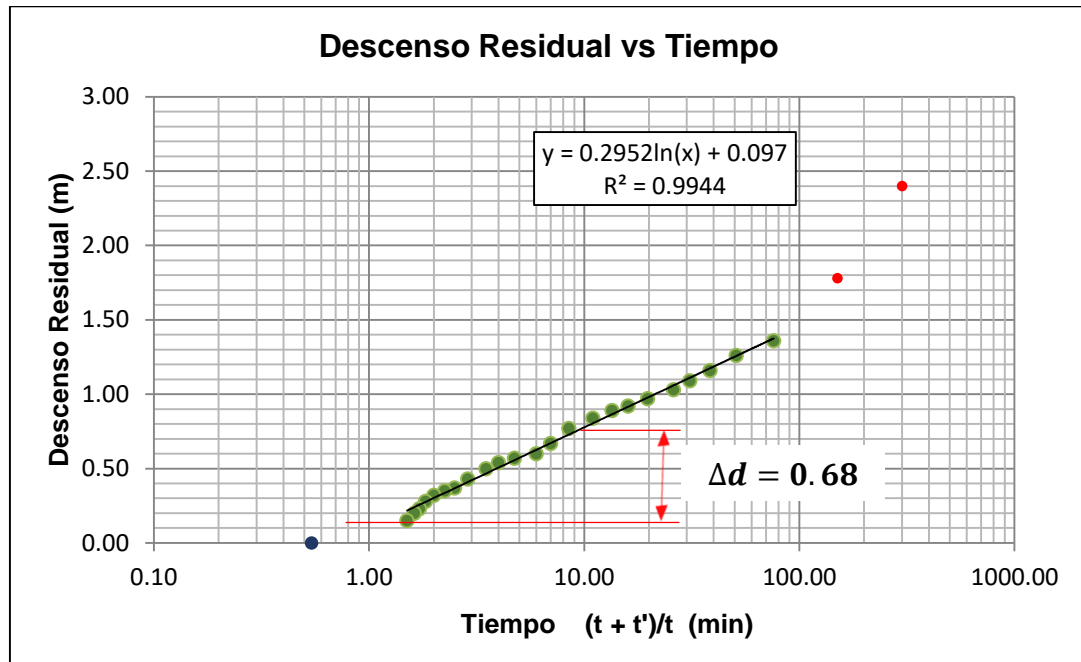


Figura 68 Recta de recuperación, Pozo Vela

### 5.3.5.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 68. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(4.5 \text{ l/s} * 86.4)}{0.68 \text{ m}}$$

$$T = 104.63 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 30, vemos que el pozo Vela (Torrecillas) se encuentra en un acuífero de media a alta capacidad para ceder agua, con caudales entre 10 a 50 l/s.

**Tabla 30** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.5.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{35.38 \text{ m}^2/\text{día}}{14 \text{ m}}$$

$$K = 7.47 \text{ m/día}$$

**Tabla 31** Valores de la permeabilidad

K (m/día)	Calificación estimada
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

Comparando el resultado con la tabla 31, vemos que el pozo Vela (Torrecillas) tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

#### **5.3.6. Prueba de bombeo: Pozo San Salvador**

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación.



**Figura 69** Pozo San Salvador

Se tuvo que ajustar la prueba de bombeo, de acuerdo a los horarios de funcionamiento establecidos por COSAALT R.L., esto con el fin de no



perjudicar la dotación de agua potable, debido a que este sistema es de bombeo directo, no cuenta con tanque de almacenamiento por lo que fue imposible apagar la bomba fuera de este horario.

**Tabla 32** Horarios de funcionamiento pozo San Salvador

<b>Hora de encendido</b>	<b>Hora de apagado</b>
05:00 am	22:00 p.m.

Fuente: COSAALT R.L.

De acuerdo a los horarios de funcionamiento, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación durante el apagado automático de la bomba (22:00 p.m.), previo al apagado de la bomba, se registró el nivel dinámico (N.D.= 55 m). El bombeo fue programado a las 5 :00 a.m. del día siguiente.



**Figura 70** Medición del nivel dinámico durante el bombeo, pozo San Salvador

A diferencia de los anteriores, en este pozo se pudo aforar el caudal, debido a que el medidor de caudal que tenía instalado funcionaba correctamente, el caudal medido ( $Q_b=5.27$  l/s) fue usado para la interpretación de la recuperación, este valor es muy similar al caudal proporcionado por COSAALT R.L. ( $Q=5.14$  l/s).



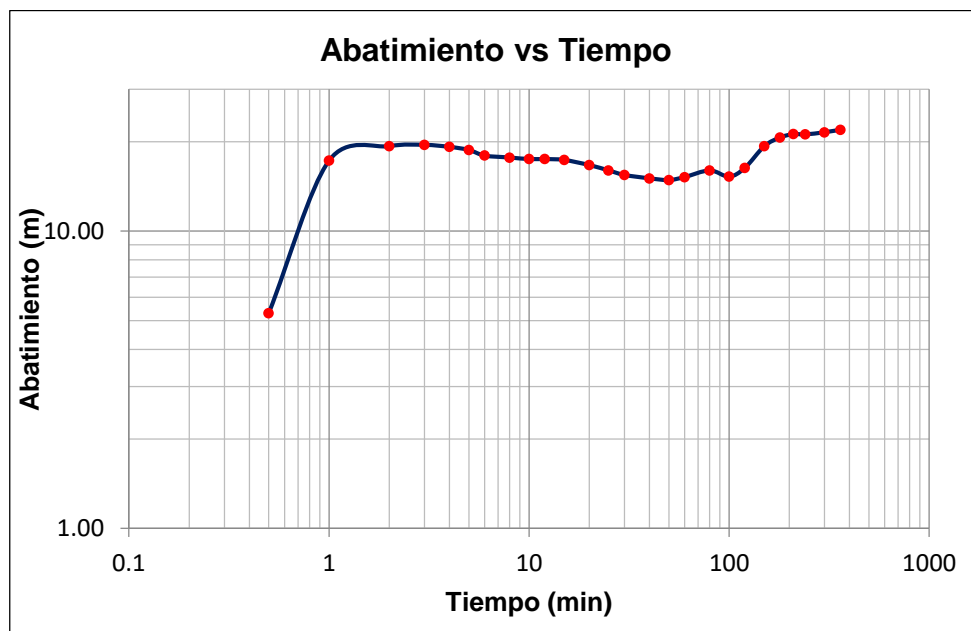


**Figura 71** Aforo del caudal de bombeo

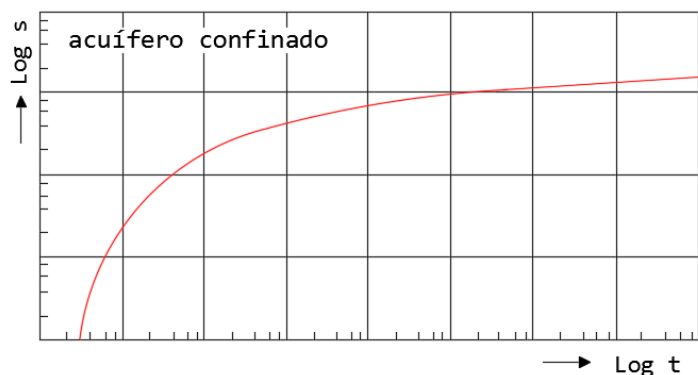
Lo resultados obtenidos en esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

### 5.3.6.1. Interpretación de la prueba de bombeo

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 72** Curva abatimiento vs tiempo, pozo San Salvador



**Figura 73** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Como se observa en la gráfica Abatimiento-Tiempo de la figura 72, vemos que el abatimiento es variable en función del tiempo, comenzando a descender y subir por momentos, de igual forma se pudo observar en campo, mediante un manómetro instalado en el pozo, la variabilidad de la presión, esto hace notar que durante el bombeo existe una variabilidad del caudal en función del consumo domiciliario del sistema. Por lo que resulta difícil clasificar al acuífero, pero por la información geológica, hidrogeológica y la ubicación del pozo se asume que el acuífero es confinado.

### 5.3.6.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob. A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo San Salvador.

**Tabla 33** Características técnicas prueba de bombeo, pozo San Salvador

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	San salvador	<b>Profundidad del pozo:</b>	141.97 m
<b>Nivel Estático:</b>	33.1 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	55.35 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	55.02 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	6 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	5.27 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	36 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	900 min	<b>Litología:</b>	S/D

**Tabla 34** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual ( $d_R$ )
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	$t'$	$t + t'$	$(t + t')/t'$		
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	33.10		900	0	900	0.00	55	21.90
0.5	38.40	5.30	900.5	0.5	900.5	1801.00	42.64	9.54
1	50.35	17.25	901	1	901	901.00	38.25	5.15
2	52.40	19.30	902	2	902	451.00	35.1	2.00
3	52.60	19.50	903	3	903	301.00	34.6	1.50
4	52.30	19.20	904	4	904	226.00	34.65	1.55
5	51.85	18.75	905	5	905	181.00	34.43	1.33
6	51.05	17.95	906	6	906	151.00	34.38	1.28
8	50.78	17.68	908	8	908	113.50	34.3	1.20
10	50.57	17.47	910	10	910	91.00	34.25	1.15
12	50.57	17.47	912	12	912	76.00	34.2	1.10
15	50.45	17.35	915	15	915	61.00	34.15	1.05
20	49.78	16.68	920	20	920	46.00	34.09	0.99
25	49.10	16.00	925	25	925	37.00	34.02	0.92
30	48.55	15.45	930	30	930	31.00	33.98	0.88
40	48.15	15.05	940	40	940	23.50	33.92	0.82
50	47.95	14.85	950	50	950	19.00	33.84	0.74
60	48.30	15.20	960	60	960	16.00	33.77	0.67
80	49.10	16.00	980	80	980	12.25	33.72	0.62
100	48.35	15.25	1000	100	1000	10.00	33.65	0.55
120	49.42	16.32	1020	120	1020	8.50	33.51	0.41
150	52.40	19.30	1050	150	1050	7.00	33.42	0.32
180	53.75	20.65	1080	180	1080	6.00	33.3	0.20
210	54.30	21.20	1110	210	1110	5.29	33.1	0.00
240	54.24	21.14						
300	54.60	21.50						
360	55.02	21.92						

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

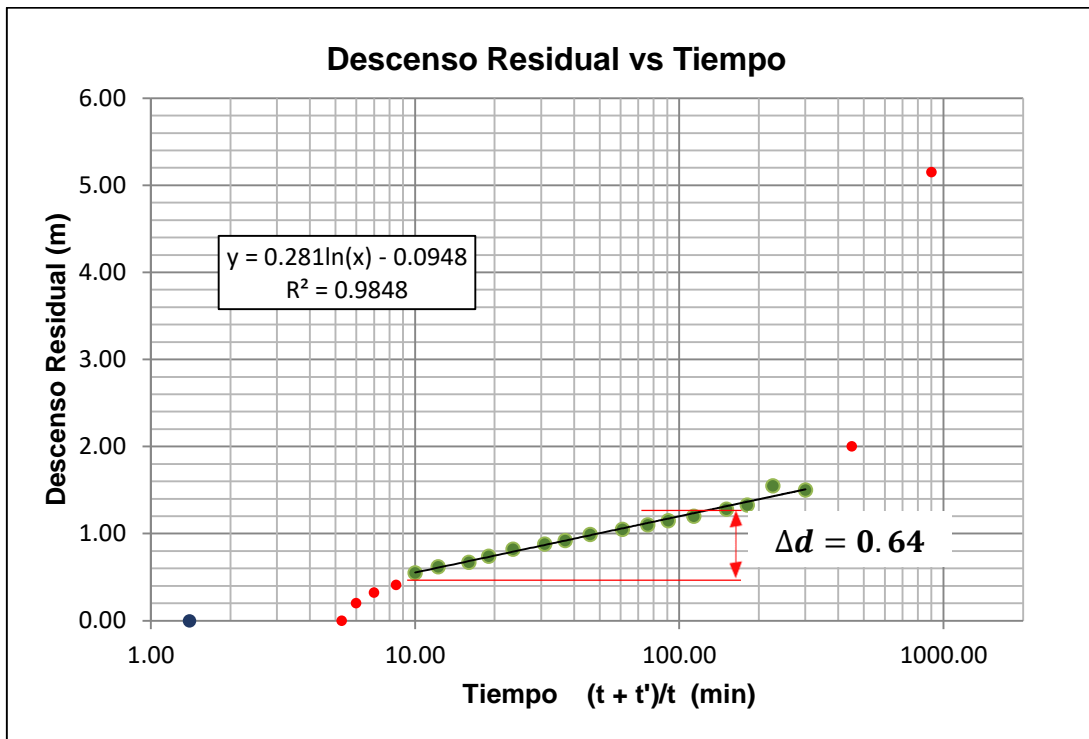


Figura 74 Recta de recuperación, pozo San Salvador

### 5.3.6.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en

la figura 74. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(5.27 \text{ l/s} * 86.4)}{0.64 \text{ m}}$$

$$T = 130.20 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 35, vemos que el pozo San Salvador se encuentra en un acuífero de media a alta capacidad para ceder agua, con caudales entre 10 a 50 l/s.

**Tabla 35** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.6.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{130.20 \text{ m}^2/\text{día}}{36 \text{ m}}$$

$$K = 3.62 \text{ m/día}$$

Comparando el resultado con la tabla 36, vemos que el pozo San Salvador, tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

**Tabla 36** Valores de la permeabilidad

K (m/día)	Calificación estimada
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.7. Prueba de bombeo: Pozo San Jorge I (PN)



**Figura 75** Pozo San Jorge I (PN)

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación. Se tuvo que ajustar la prueba de bombeo, de acuerdo a los horarios de funcionamiento establecidos por COSAALT R.L., esto con el fin de no perjudicar la dotación de agua potable.

**Tabla 37** Horarios de funcionamiento pozo San Jorge I

<b>Hora de encendido</b>	<b>Hora de apagado</b>
06:00 am	8:00 p.m.

Fuente: COSAALT R.L.

De acuerdo a los horarios de funcionamiento, se programó la prueba para registrar inicialmente el bombeo (7:00 a.m.) retrasando una hora su encendido, previo al encendido de la bomba, se registró el nivel estático (N.E.= 30.23 m), la recuperación se programó durante el apagado automático de la bomba (08:00 p.m.), pero en realidad se apagó 35 minutos antes.



**Figura 76** Medición de la recuperación, pozo San Jorge I (PN)

Al igual que en el anterior pozo, en este pozo se pudo aforar el caudal, debido a que el medidor de caudal que tenía instalado funcionaba

correctamente, el caudal medido ( $Q_b=5.14$  l/s) fue usado para la interpretación de la recuperación.

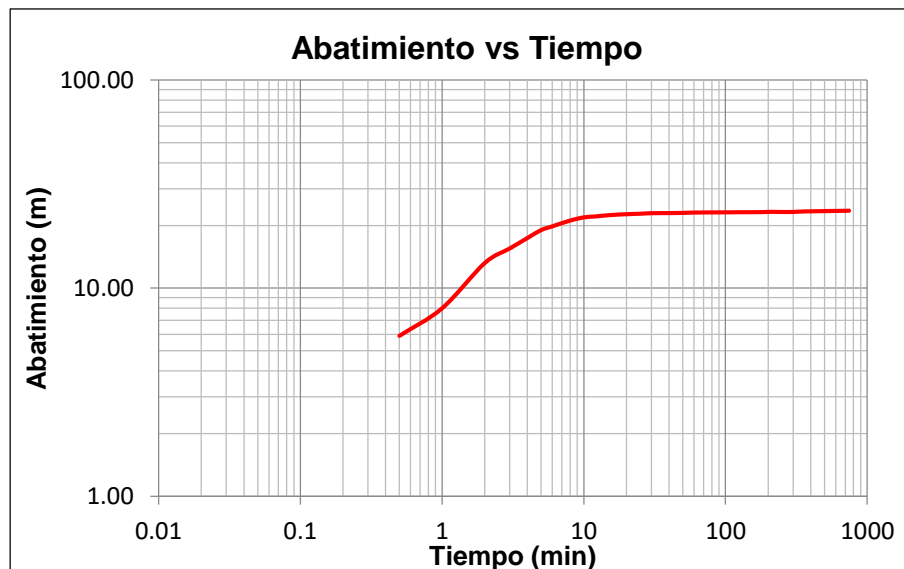


**Figura 77** Aforo del caudal de bombeo

Los resultados de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

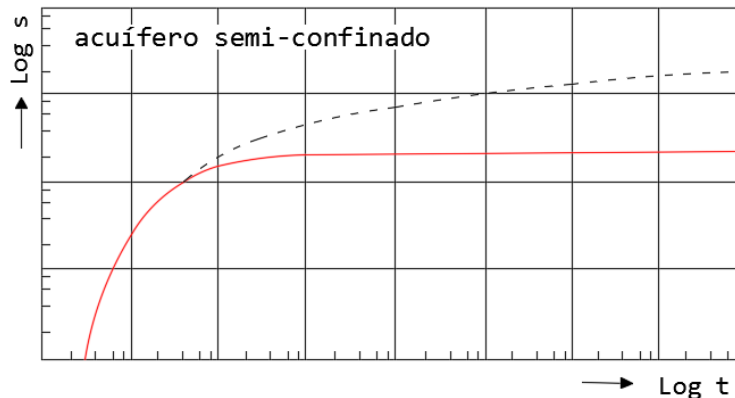
### **5.3.7.1. Interpretación de la prueba de bombeo**

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento vs Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 78** Curva abatimiento vs tiempo, pozo San Jorge I (PN)





**Figura 79** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero semiconfinado

Fuente: Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, podemos observar que la curva se asemeja a un acuífero Semiconfinado, por lo que se concluye que el pozo San Jorge I se encuentra en un acuífero semiconfinado.

### 5.3.7.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo San Jorge I.

**Tabla 38** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo San Jorge I (PN)

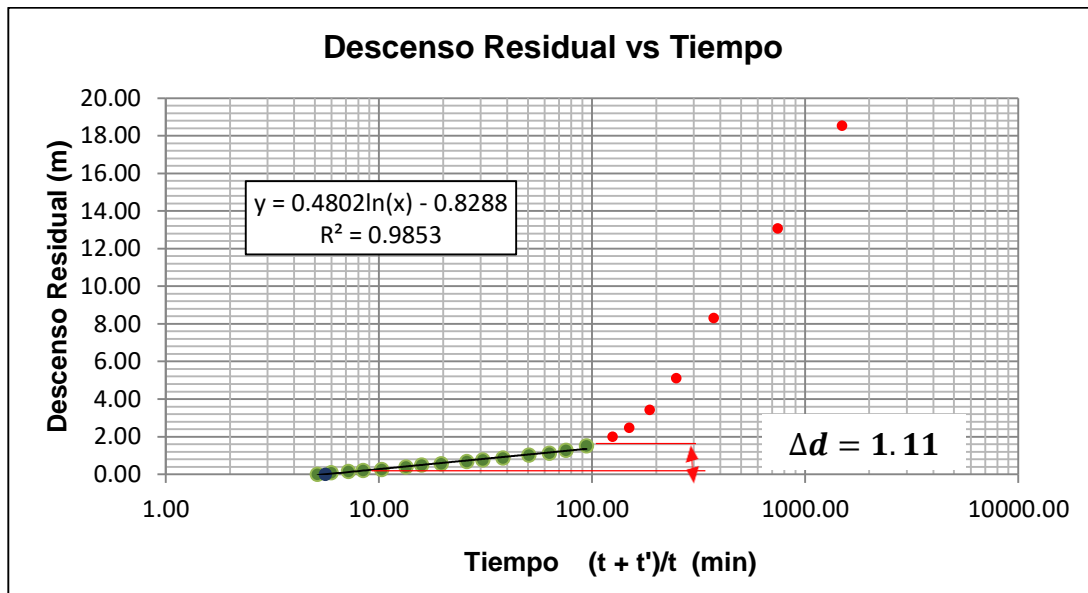
Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	San Jorge I (PN)	<b>Profundidad del pozo:</b>	S/D m
<b>Nivel Estático:</b>	30.23 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	S/D m
<b>Nivel Dinámico:</b>	54.44 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	S/D pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	5.14 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	S/D m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	745 min	<b>Litología:</b>	S/D

**Tabla 39** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual ( $d_R$ )
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	$t'$	$t + t'$	$(t + t')/t'$		
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	30.90		745	0	745	0.00	54.44	24.21
0.5	36.80	5.90	745.5	0.5	745.5	1491.00	48.77	18.54
1	38.90	8.00	746	1	746	746.00	43.3	13.07
2	44.10	13.20	747	2	747	373.50	38.53	8.30
3	46.40	15.50	748	3	748	249.33	35.34	5.11
4	48.30	17.40	749	4	749	187.25	33.65	3.42
5	49.90	19.00	750	5	750	150.00	32.7	2.47
6	50.70	19.80	751	6	751	125.17	32.23	2.00
8	52.00	21.10	753	8	753	94.13	31.74	1.51
10	52.77	21.87	755	10	755	75.50	31.5	1.27
12	52.98	22.08	757	12	757	63.08	31.35	1.12
15	53.31	22.41	760	15	760	50.67	31.25	1.02
20	53.55	22.65	765	20	765	38.25	31.1	0.87
25	53.67	22.77	770	25	770	30.80	31	0.77
30	53.80	22.90	775	30	775	25.83	30.92	0.69
40	53.83	22.93	785	40	785	19.63	30.8	0.57
50	53.88	22.98	795	50	795	15.90	30.72	0.49
60	53.96	23.06	805	60	805	13.42	30.63	0.40
80	54.00	23.10	825	80	825	10.31	30.48	0.25
100	54.02	23.12	845	100	845	8.45	30.43	0.20
120	54.05	23.15	865	120	865	7.21	30.39	0.16
150	54.06	23.16	895	150	895	5.97	30.31	0.08
180	54.08	23.18	925	180	925	5.14	30.23	0.00
210	54.14	23.24						
240	54.12	23.22						
300	54.12	23.22						
360	54.25	23.35						
745	54.44	23.54						

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.



**Figura 80** Recta de recuperación, pozo San Jorge I

### 5.3.7.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T).

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 80. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal esta en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(5.14 \text{ l/s} * 86.4)}{1.11 \text{ m}}$$

$$T = 73.22 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 40, vemos que el pozo San Jorge I se encuentra en un acuífero de baja capacidad para ceder agua, con caudales entre 1 a 10 l/s.

**Tabla 40** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martinez & Iglesias Lopez, 1984, IGME.

### 5.3.7.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

En este caso no se pudo determinar la conductividad hidráulica debido a que se desconoce el espesor del acuífero, porque no se cuenta con el perfil litológico, ni el perfil de ubicación de filtros del pozo.

### 5.3.8. Prueba de bombeo: Pozo Simón Bolívar (Antiguo)

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación.



**Figura 81** Pozo Simón Bolívar (Antiguo)

A diferencia de los anteriores pozos, el pozo Simón Bolívar (Antiguo) funciona las 24 horas, pero con el consentimiento de COSAALT, se logró apagar unas tres horas. En coordinación con el operador del pozo se vio por conveniente apagar la bomba en horarios de poco consumo de agua potable.

Por lo que, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación apagando la bomba a horas 15:00 p.m., previo al apagado de la bomba, se registró el nivel dinámico (N.D.= 100.80 m), posteriormente pasada las tres horas se registró el bombeo.



**Figura 82** Medición de la recuperación, pozo Simón Bolívar (Antiguo)

En este pozo no se pudo aforar el caudal, debido a que el pozo no contaba con medidor de caudal y la tubería de desagüe se encontraba clausurado. Por lo que el caudal ( $Q_b=9.19$  l/s) usado para la interpretación fue proporcionado por COSAALT R.L.

El tiempo de bombeo, usado para la interpretación, fue asumido de 24 horas (1440 min), debido a su funcionamiento continuo todos los días.

Lo resultados de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

#### 5.3.8.1. Interpretación de la prueba de bombeo

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.

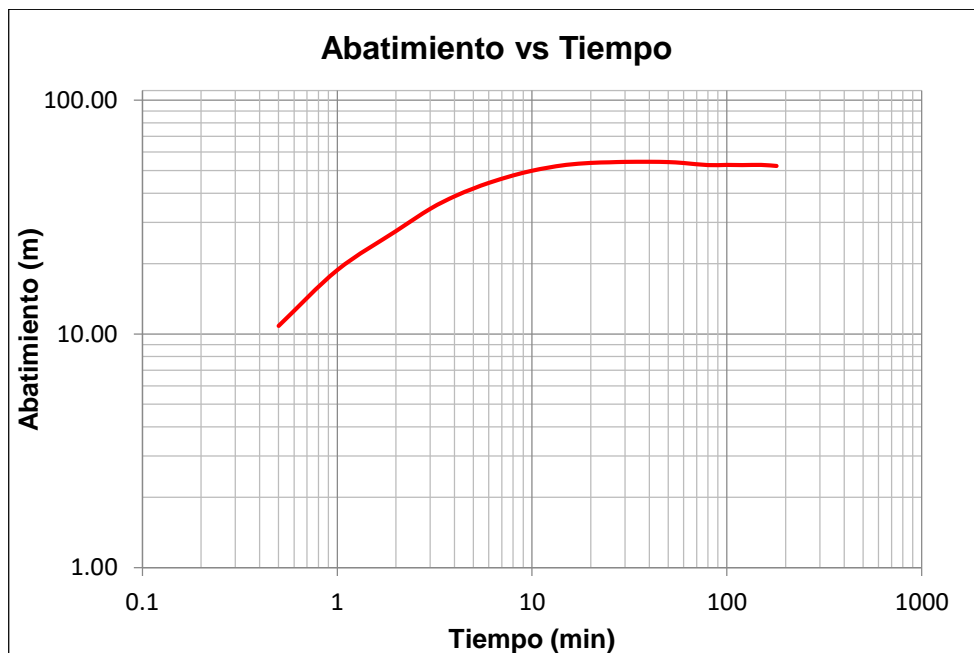
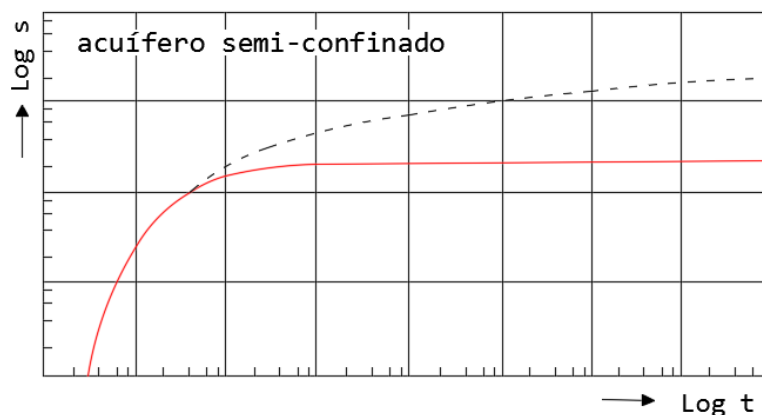


Figura 83 Curva abatimiento vs tiempo, Simón Bolívar (Antiguo)



**Figura 84** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero semiconfinado

Fuente: Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, podemos observar que la curva se asemeja a un acuífero Semiconfinado, por lo que se concluye que el pozo Simón Bolívar (Antiguo) está en un acuífero semiconfinado.

### 5.3.8.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo Simón Bolívar (Antiguo)

**Tabla 41** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo Simón Bolívar (Antiguo)

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	Simón Bolívar (Antig.)	<b>Profundidad del pozo:</b>	133 m
<b>Nivel Estático:</b>	42.6 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	58.75 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	100.8 m	<b>Díámetro del pozo:</b>	8 Pulg.
<b>Caudal de Bombeo:</b>	9.19 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	25.9 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	1440 min	<b>Litología:</b>	Grava+ Arena

**Tabla 42** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual ( $d_R$ )
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	$t'$	$t + t'$	$(t + t')/t'$		
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	45.56		1440	0	1440	0.00	100.8	58.20
0.5	56.38	10.82	1440.5	0.5	1440.5	2881.00	92.23	49.63
1	64.31	18.75	1441	1	1441	1441.00	83.3	40.70
2	73.08	27.52	1442	2	1442	721.00	71.65	29.05
3	79.84	34.28	1443	3	1443	481.00	63.17	20.57
4	84.34	38.78	1444	4	1444	361.00	56.98	14.38
5	87.43	41.87	1445	5	1445	289.00	53.1	10.50
6	89.84	44.28	1446	6	1446	241.00	50.79	8.19
8	93.21	47.65	1448	8	1448	181.00	48.2	5.60
10	95.46	49.90	1450	10	1450	145.00	47.57	4.97
12	96.93	51.37	1452	12	1452	121.00	47.25	4.65
15	98.44	52.88	1455	15	1455	97.00	46.98	4.38
20	99.46	53.90	1460	20	1460	73.00	46.7	4.10
25	99.78	54.22	1465	25	1465	58.60	46.57	3.97
30	100.00	54.44	1470	30	1470	49.00	46.47	3.87
40	100.06	54.50	1480	40	1480	37.00	46.3	3.70
50	99.90	54.34	1490	50	1490	29.80	46.15	3.55
60	99.41	53.85	1500	60	1500	25.00	46.08	3.48
80	98.31	52.75	1520	80	1520	19.00	45.93	3.33
100	98.41	52.85	1540	100	1540	15.40	45.82	3.22
120	98.31	52.75	1560	120	1560	13.00	45.75	3.15
150	98.41	52.85	1590	150	1590	10.60	45.65	3.05
180	97.86	52.30	1620	180	1620	9.00	45.56	2.96

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los



tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

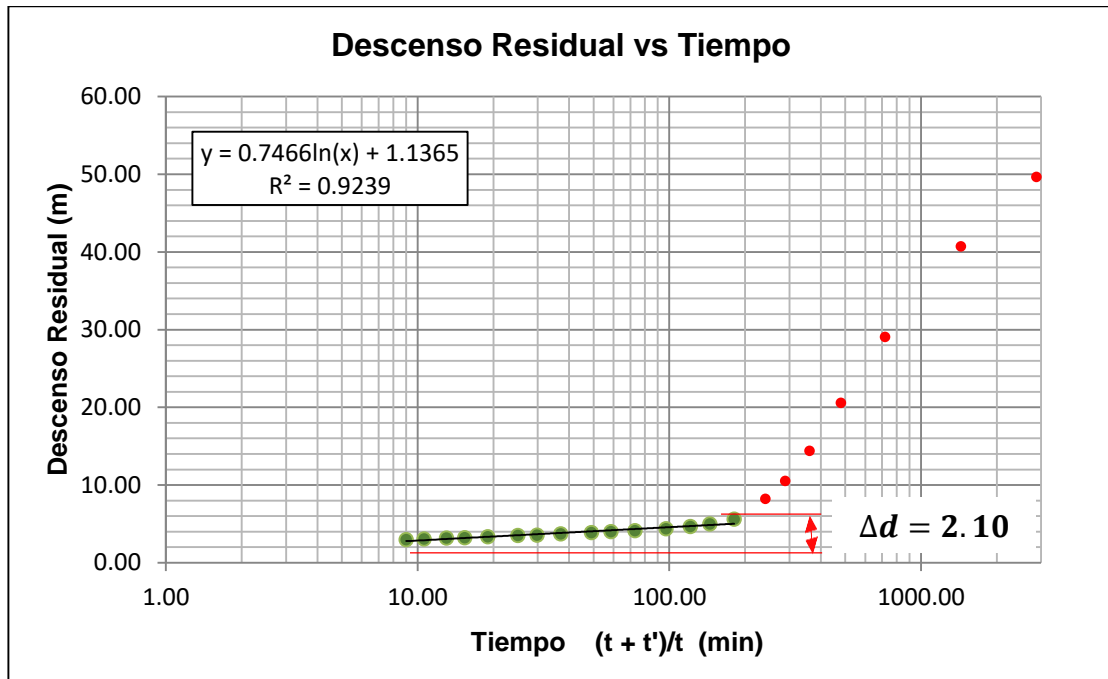


Figura 85 Recta de recuperación, pozo Simón Bolívar (Antiguo)

### 5.3.8.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 85. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(9.19 \text{ l/s} * 86.4)}{2.10 \text{ m}}$$

$$T = 69.19 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 43, vemos que el pozo Simón Bolívar (Antiguo) se encuentra en un acuífero de baja capacidad para ceder agua, con caudales entre 1 a 10 l/s.

**Tabla 43** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

#### 5.3.8.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{69.19 \text{ m}^2/\text{día}}{25.9 \text{ m}}$$

$$K = 2.67 \text{ m/día}$$

Comparando el resultado con la tabla 44, vemos que el pozo Simón Bolívar (Antiguo), tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero regular a bueno.

**Tabla 44** Valores de la permeabilidad

<b>K (m/día)</b>	<b>Calificación estimada</b>
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### **5.3.9. Prueba de bombeo: Pozo ANASPUGIO B**

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación.



**Figura 86** Pozo ANASPUGIO B

Este pozo funciona las 24 horas y al igual que el anterior se consiguió apagar tres horas. En coordinación con el operador del pozo se vio por conveniente apagar la bomba en horarios de poco consumo de agua potable.

Por lo que, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación apagando la bomba a horas 15:00 p.m., previo al apagado de la

bomba, se registró el nivel dinámico (N.D.= 88.90 m), este dato corresponde a la medición donde el zonda toca fondo, pero no hace contacto con el agua, por lo que se presume que no es el nivel dinámico real, posteriormente pasada las tres horas se registró el bombeo.



**Figura 87** Medición de la recuperación, pozo ANASPUGIO B

Una vez registrada la prueba de recuperación, se encendió la bomba y el descenso fue muy rápido, solo se pudo registrar 5 datos (0.5, 1, 2, 3, 4 min), cuando se procedió a medir en el minuto 5 el zonda toco fondo y no hizo contacto con el agua, llegando a una profundidad de 88.90 m, la misma medida registrada antes del apagado.

En este pozo no se pudo aforar el caudal, debido a que el pozo no contaba con medidor de caudal y la tubería de desagüe se encontraba clausurado. Por lo que el caudal ( $Q_b=11.58$  l/s) usado para la interpretación fue proporcionado por COSAALT.



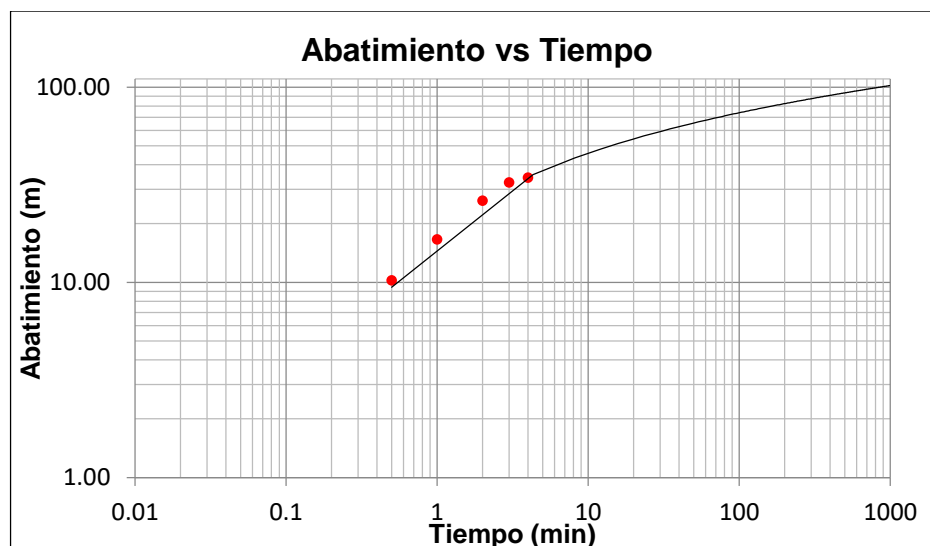
**Figura 88** Tubería de desagüe clausurado

El tiempo de bombeo, usado para la interpretación, fue asumido de 24 horas (1440 min), debido a su funcionamiento continuo todos los días.

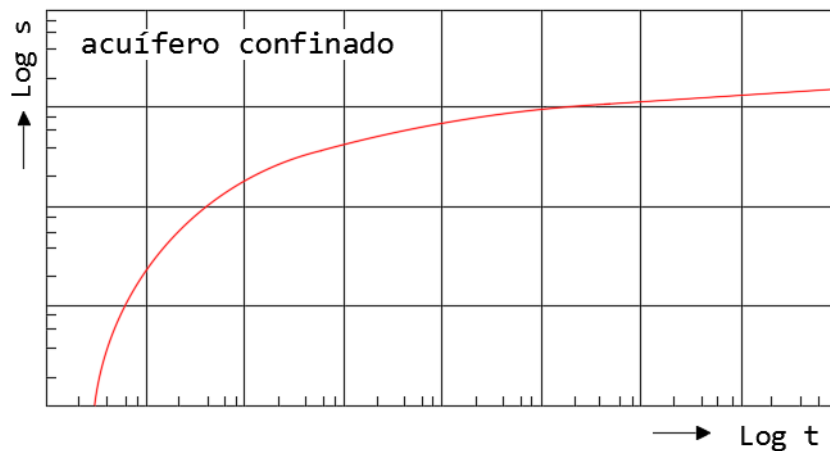
Lo resultados obtenidos en esta prueba, se presentan en ANEXOS F.

### 5.3.9.1. Interpretación de la prueba de bombeo

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 89** Curva abatimiento vs tiempo, pozo ANASPUGIO B



**Figura 90** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero confinado.

### 5.3.9.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo ANASPUGIO B.

**Tabla 45** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo ANASPUGIO B

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	ANASPUGIO B	<b>Profundidad del pozo:</b>	220 m
<b>Nivel Estático:</b>	53.2 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	80 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	88.9 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	10 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	11.58 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	47 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	1440 min	<b>Litología:</b>	S/D

**Tabla 46** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN					
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t'	t + t'	(t + t')/t'	Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (d <sub>R</sub> )
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	54.57		1440	0	1440	0.00	88.9	35.70
0.5	64.80	10.23	1440.5	0.5	1440.5	2881.00	83.5	30.30
1	71.15	16.58	1441	1	1441	1441.00	78.1	24.90
2	80.70	26.13	1442	2	1442	721.00	69.2	16.00
3	86.95	32.38	1443	3	1443	481.00	63.1	9.90
4	88.90	34.33	1444	4	1444	361.00	59.50	6.30
5			1445	5	1445	289.00	57.5	4.30
6			1446	6	1446	241.00	56.65	3.45
8			1448	8	1448	181.00	56.48	3.28
10			1450	10	1450	145.00	56.41	3.21
12			1452	12	1452	121.00		
15			1455	15	1455	97.00		
20			1460	20	1460	73.00	55.8	2.60
25			1465	25	1465	58.60	55.6	2.40
30			1470	30	1470	49.00	55.47	2.27
40			1480	40	1480	37.00	55.35	2.15
50			1490	50	1490	29.80	55.25	2.05
60			1500	60	1500	25.00	55.16	1.96
80			1520	80	1520	19.00	55.02	1.82
100			1540	100	1540	15.40	54.92	1.72
120			1560	120	1560	13.00	54.83	1.63
150			1590	150	1590	10.60	54.7	1.50
180			1620	180	1620	9.00	54.57	1.37

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los

tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

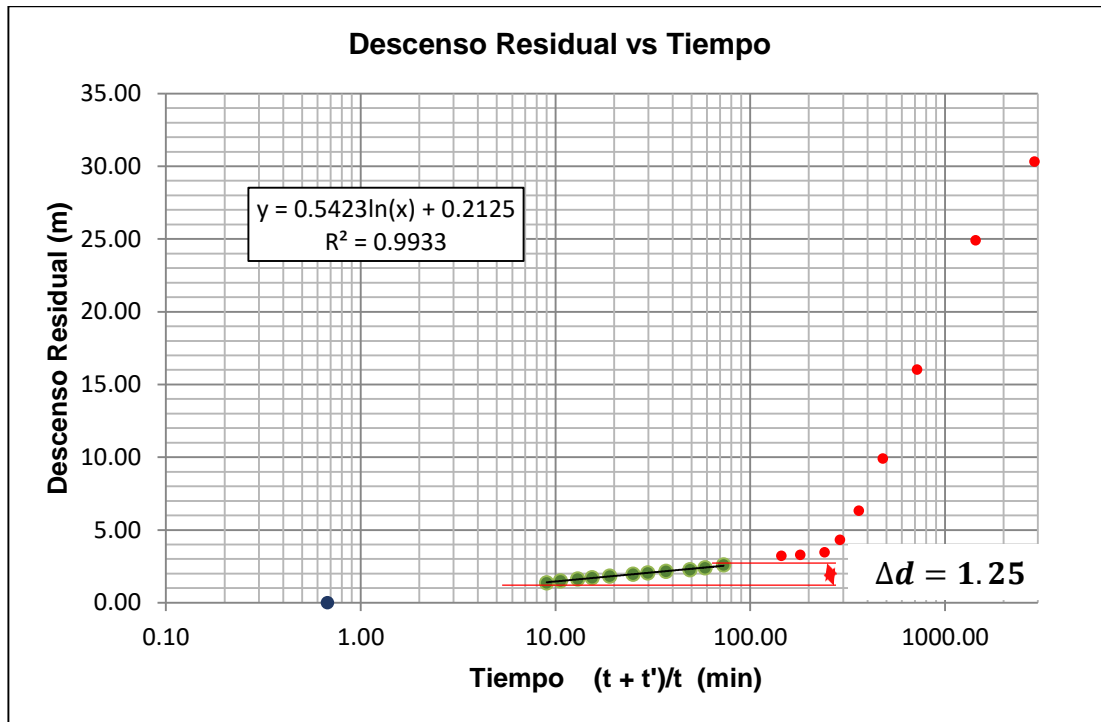


Figura 91 Recta de recuperación, pozo ANASPUGIO B

### 5.3.9.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 91. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.



$$T = 0.183 \frac{(11.58 \text{ l/s} * 86.4)}{1.25 \text{ m}}$$

$$T = 146.47 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 47, vemos que el pozo ANASPUGIO B se encuentra en un acuífero de media a alta capacidad para ceder agua, con caudales entre 10 a 50 l/s.

**Tabla 47** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.9.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{146.47 \text{ m}^2/\text{día}}{47 \text{ m}}$$

$$K = 3.12 \text{ m/día}$$

Comparando el resultado con la tabla 48, vemos que el pozo ANASPUGIO B tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

**Tabla 48** Valores de la permeabilidad

K (m/día)	Calificación estimada
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.10. Prueba de bombeo: Pozo San Gerónimo (PN)

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación.



**Figura 92** Pozo San Jerónimo (PN)

Este pozo se encontraba funcionando las 24 horas, pero con el consentimiento de COSAALT, se consiguió apagar tres horas. En coordinación con el operador, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación apagando la bomba a horas 09:00 a.m., previo al apagado de la bomba, se registró el nivel dinámico (N.D.= 19.88 m), posteriormente pasada las tres horas se registró el bombeo.



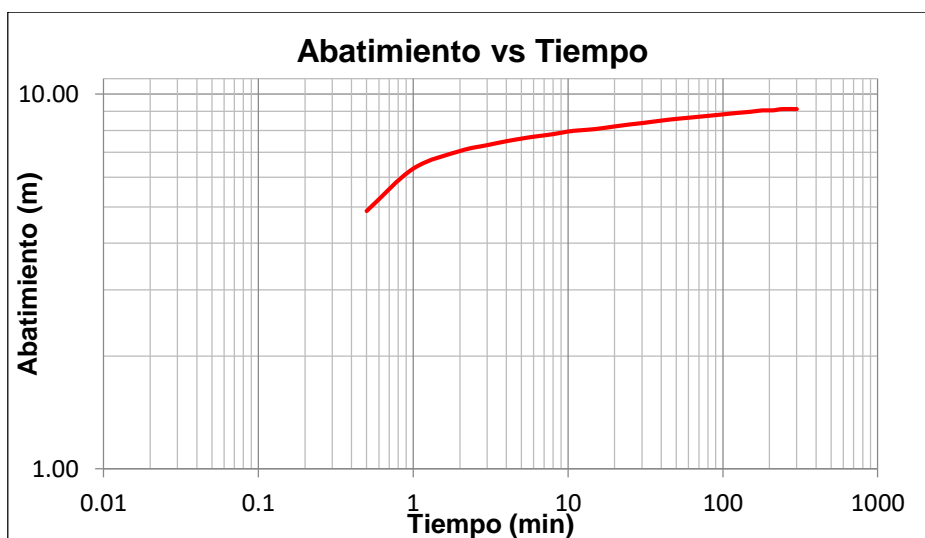
**Figura 93** Medición de la recuperación, pozo San Jerónimo (PN)

En este pozo no se pudo aforar el caudal, por lo que el caudal ( $Q_b=6.81$  l/s) usado para la interpretación fue proporcionado por COSAALT R.L., el tiempo de bombeo, usado para la interpretación, fue asumido de 24 horas (1440 min), debido a su funcionamiento continuo todos los días.

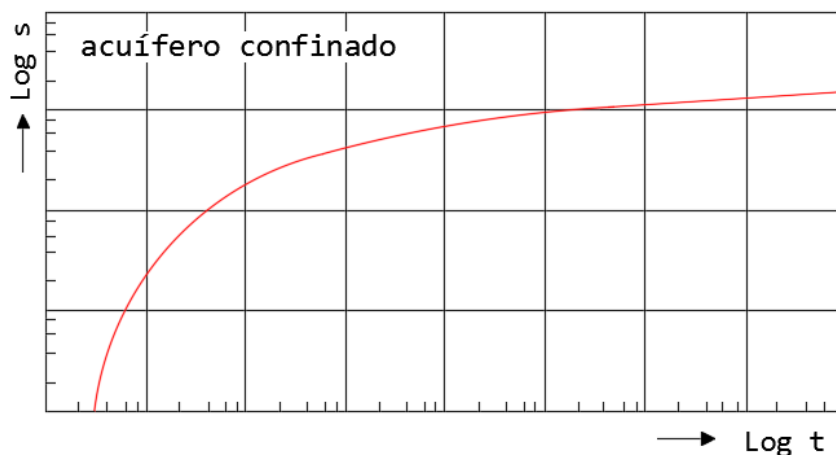
Los resultados obtenidos en esta prueba, se presentan en ANEXOS F.

#### **5.3.10.1. Interpretación de la prueba de bombeo**

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 94** Curva abatimiento vs tiempo, pozo San Jerónimo (PN)



**Figura 95** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero confinado.

### 5.3.10.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo San Jerónimo (PN).

**Tabla 49** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo San Jerónimo (PN)

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	San Jerónimo(PN)	<b>Profundidad del pozo:</b>	189 m
<b>Nivel Estático:</b>	10.35 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	S/D m
<b>Nivel Dinámico:</b>	19.47 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	8 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	6.81 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	30 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	1440 min	<b>Litología:</b>	S/D

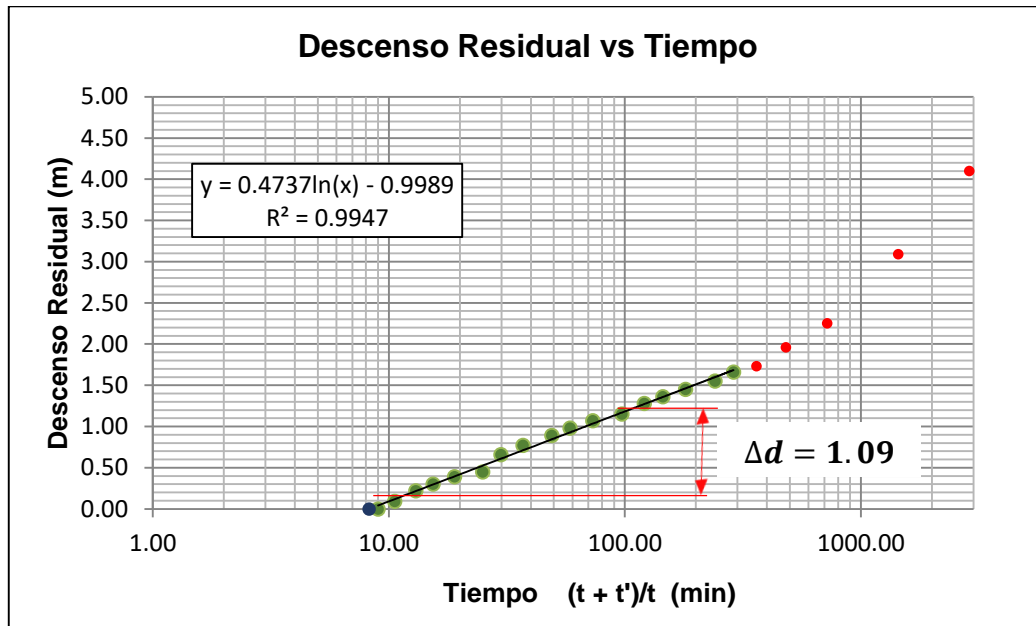
**Tabla 50** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual ( $d_R$ )
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	$t'$	$t + t'$	$(t + t')/t'$		
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	10.35		1440	0	1440	0.00	19.88	9.53
0.5	15.23	4.88	1440.5	0.5	1440.5	2881.00	14.45	4.10
1	16.68	6.33	1441	1	1441	1441.00	13.44	3.09
2	17.40	7.05	1442	2	1442	721.00	12.6	2.25
3	17.66	7.31	1443	3	1443	481.00	12.31	1.96
4	17.84	7.49	1444	4	1444	361.00	12.08	1.73
5	17.96	7.61	1445	5	1445	289.00	12.01	1.66
6	18.05	7.70	1446	6	1446	241.00	11.9	1.55
8	18.17	7.82	1448	8	1448	181.00	11.8	1.45
10	18.30	7.95	1450	10	1450	145.00	11.71	1.36
12	18.36	8.01	1452	12	1452	121.00	11.63	1.28
15	18.42	8.07	1455	15	1455	97.00	11.5	1.15
20	18.55	8.20	1460	20	1460	73.00	11.42	1.07
25	18.65	8.30	1465	25	1465	58.60	11.33	0.98
30	18.72	8.37	1470	30	1470	49.00	11.24	0.89
40	18.85	8.50	1480	40	1480	37.00	11.12	0.77
50	18.94	8.59	1490	50	1490	29.80	11.01	0.66
60	19.00	8.65	1500	60	1500	25.00	10.8	0.45
80	19.10	8.75	1520	80	1520	19.00	10.74	0.39
100	19.18	8.83	1540	100	1540	15.40	10.65	0.30
120	19.25	8.90	1560	120	1560	13.00	10.57	0.22
150	19.32	8.97	1590	150	1590	10.60	10.44	0.09
180	19.40	9.05	1620	180	1620	9.00	10.35	0.00
210	19.40	9.05						
240	19.47	9.12						
300	19.47	9.12						

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por

tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.



**Figura 96** Recta de recuperación, pozo San Jerónimo (PN)

### 5.3.10.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 96. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(6.81 \text{ /s} * 86.4)}{1.09 \text{ m}}$$

$$T = 98.78 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 51, vemos que el pozo San Jerónimo (PN) se encuentra en un acuífero de baja capacidad para ceder agua, con caudales entre 1 a 10 l/s.

**Tabla 51** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.10.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{98.78 \text{ m}^2/\text{día}}{30 \text{ m}}$$

$$K = 3.12 \text{ m/día}$$

Comparando el resultado con la tabla 52, vemos que el pozo San Jerónimo, tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

**Tabla 52** Valores de la permeabilidad.

K (m/día)	Calificación estimada
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.11. Prueba de bombeo: Pozo Luis Espinal B

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, ya que no se dispone de un pozo de observación.



**Figura 97** Pozo Luis Espinal B

Se tuvo que ajustar la prueba de bombeo, de acuerdo a los horarios de funcionamiento establecidos por COSAALT R.L., esto con el fin de no



perjudicar la dotación de agua potable, debido a que el sistema de este pozo, es de bombeo directo y no cuenta con tanque de almacenamiento.

**Tabla 53** Horario de funcionamiento pozo Luis Espinal B

<b>Hora de encendido</b>	<b>Hora de apagado</b>
04:00 am	23:00 p.m.

Fuente: COSAALT R.L.

En base a este horario, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación durante el apagado automático de la bomba (23:00 p.m.), previo al apagado de la bomba, se registró el nivel dinámico (N.D.= 64.04 m). posteriormente se registró el bombeo.

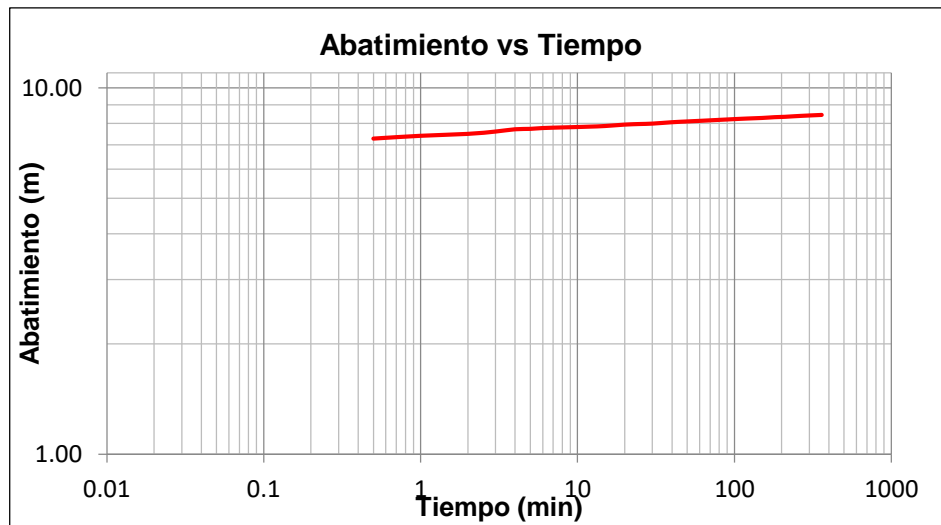


**Figura 98** Medición de la recuperación, pozo Luis Espinal B

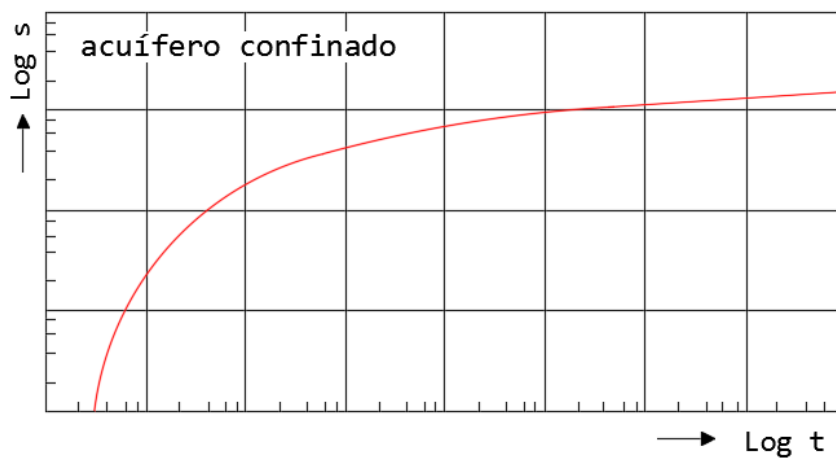
Los resultados obtenidos de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

#### **5.3.11.1. Interpretación de la prueba de bombeo**

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 99** Curva abatimiento vs tiempo, pozo Luis Espinal B



**Figura 100** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado.

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero confinado.

### 5.3.11.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob. A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el

periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo Luis Espinal B.

**Tabla 54** Características técnicas prueba de bombeo, pozo Luis Espinal B

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	Luis Espinal B	<b>Profundidad del pozo:</b>	210 m
<b>Nivel Estático:</b>	55.35 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	68 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	63.8 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	10 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	9.7 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	45 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	1140 min	<b>Litología:</b>	S/D

**Tabla 55** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN					
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t´	t + t´	(t + t´)/t´	Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (d <sub>R</sub> )
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	55.35		1140	0	1140	0.00	64.04	8.69
0.5	62.63	7.28	1140.5	0.5	1140.5	2281.00	56.5	1.15
1	62.76	7.41	1141	1	1141	1141.00	56.38	1.03
2	62.85	7.50	1142	2	1142	571.00	56.29	0.94
3	62.96	7.61	1143	3	1143	381.00	56.22	0.87
4	63.07	7.72	1144	4	1144	286.00	56.15	0.80
5	63.09	7.74	1145	5	1145	229.00	56.13	0.78
6	63.13	7.78	1146	6	1146	191.00	56.1	0.75
8	63.16	7.81	1148	8	1148	143.50	56.07	0.72
10	63.18	7.83	1150	10	1150	115.00	56.03	0.68
12	63.20	7.85	1152	12	1152	96.00	56	0.65
15	63.23	7.88	1155	15	1155	77.00	55.98	0.63
20	63.30	7.95	1160	20	1160	58.00	55.94	0.59
25	63.33	7.98	1165	25	1165	46.60	55.91	0.56
30	63.35	8.00	1170	30	1170	39.00	55.88	0.53
40	63.42	8.07	1180	40	1180	29.50	55.84	0.49
50	63.46	8.11	1190	50	1190	23.80	55.79	0.44
60	63.49	8.14	1200	60	1200	20.00	55.77	0.42
80	63.54	8.19	1220	80	1220	15.25	55.71	0.36
100	63.58	8.23	1240	100	1240	12.40	55.67	0.32
120	63.61	8.26	1260	120	1260	10.50	55.63	0.28

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual ( $d_R$ )
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	$t'$	$t + t'$	$(t + t')/t'$		
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
150	63.64	8.29	1290	150	1290	8.60	55.6	0.25
180	63.68	8.33	1320	180	1320	7.33	55.57	0.22
210	63.70	8.35	1350	210	1350	6.43	55.46	0.11
240	63.73	8.38	1380	240	1380	5.75	55.44	0.09
300	63.77	8.42	1440	300	1440	4.80	55.35	0.00
360	63.8	8.45						

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.

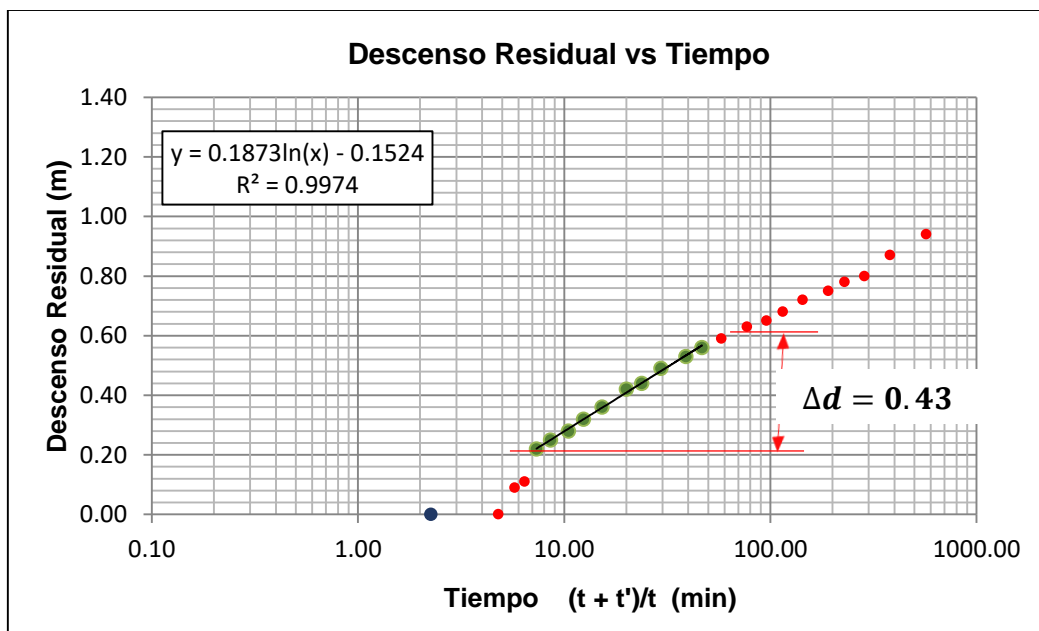


Figura 101 Recta de recuperación, pozo Luis Espinal B

### 5.3.11.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 101. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(9.7 \text{ l/s} * 86.4)}{0.43 \text{ m}}$$

$$T = 356.67 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 56, vemos que el pozo Luis Espinal B se encuentra en un acuífero de media a alta capacidad para ceder agua, con caudales entre 10 a 50 l/s.

**Tabla 56** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.11.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero *b*, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{356.67 \text{ m}^2/\text{día}}{45 \text{ m}}$$

$$K = 7.93 \text{ m/día}$$

Comparando el resultado con la tabla 57, vemos que el pozo Luis Espinal B, tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

**Tabla 57** Valores de la permeabilidad

K (m/día)	Calificación estimada
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.12. Prueba de bombeo: Pozo AVIT A

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo.

Aunque existe un pozo cercano (AVIT B) a 30 m de distancia aproximadamente, según información del operador estos pozos no tienen conexión hidráulica.



**Figura 102** Pozo AVIT A

Se tuvo que ajustar la prueba de bombeo, de acuerdo a los horarios de funcionamiento establecidos por COSAALT R.L., esto con el fin de no perjudicar la dotación de agua potable durante el día.

**Tabla 58** Horario de funcionamiento pozo AVIT A

<b>Hora de encendido</b>	<b>Hora de apagado</b>
06:00 am	9:00 p.m.

Fuente: COSAALT R.L.

En base a este horario, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación durante el apagado de la bomba (9:00 p.m.), previo al apagado de la bomba, se registró el nivel dinámico (N.D.= 48.48 m), en una segunda fase se registró el bombeo (6:00 a.m.).



**Figura 103** Medición de la recuperación, pozo AVIT A

El caudal ( $Q_b=19.41$  l/s) utilizado para la interpretación de la prueba, fue aforado en el medidor de caudal que tiene instalado el pozo.

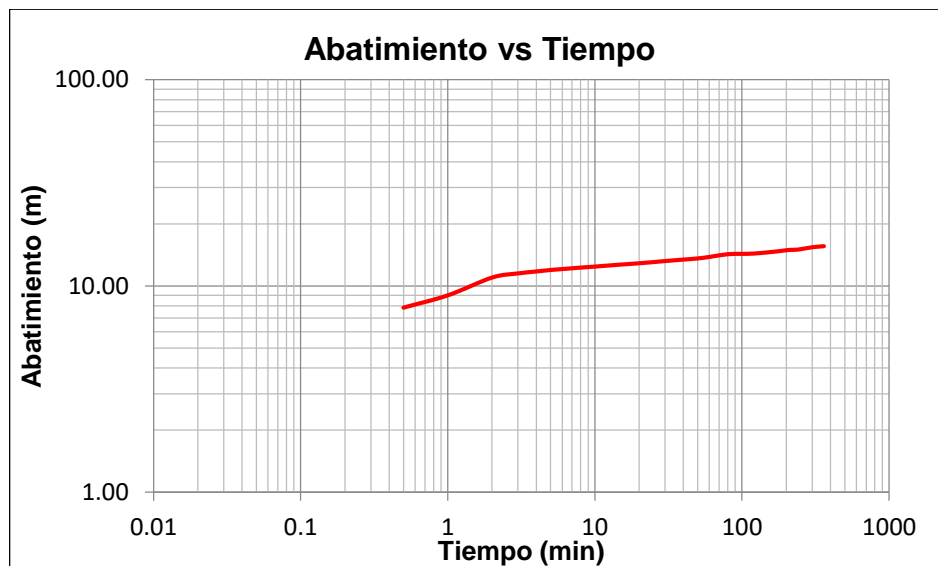


**Figura 104** Medidor de caudal, pozo AVIT A

Los resultados de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

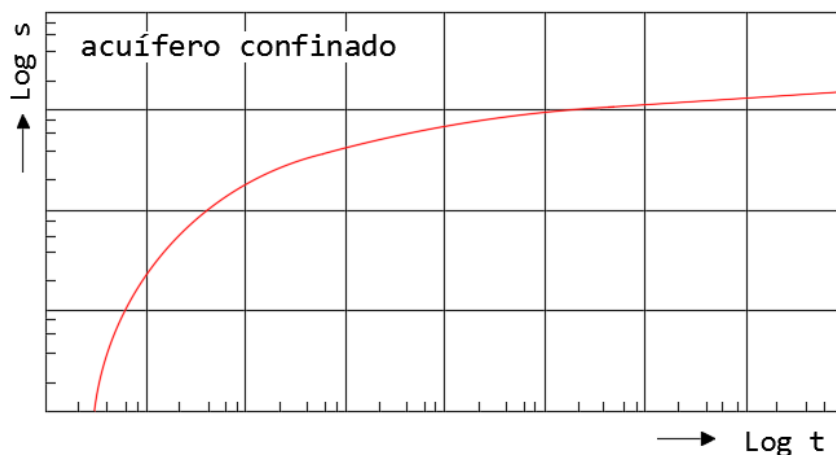
### 5.3.12.1. Interpretación de la prueba de bombeo

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento-Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 105** Curva abatimiento vs tiempo, pozo AVIT A





**Figura 106** Curva Típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero confinado.

### 5.3.12.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo AVIT A.

**Tabla 59** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo AVIT A

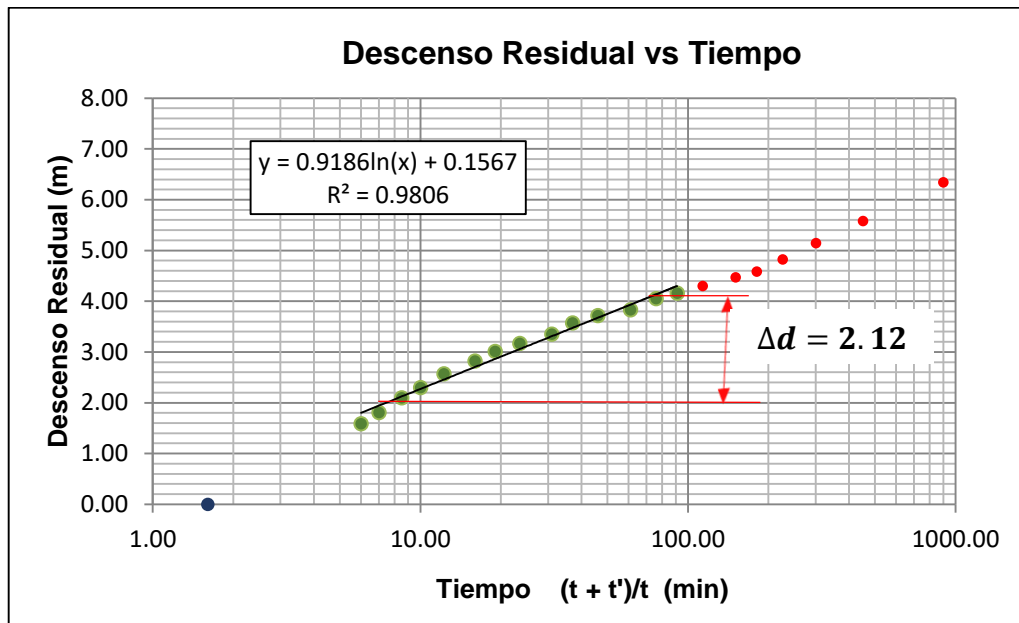
Información general			
<b>Nombre de pozo:</b>	AVIT A	<b>Profundidad del pozo:</b>	111 m
<b>Nivel Estático:</b>	32.1 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	S/D m
<b>Nivel Dinámico:</b>	48.48 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	10 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	19.41 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	29 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	900 min	<b>Litología:</b>	Gravas

**Tabla 60** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN					Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual ( $d_R$ )
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	$t'$	$t + t'$	$(t + t')/t'$			
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)	
0	32.10		900	0	900	0.00	48.48	16.38	
0.5	39.95	7.85	900.5	0.5	900.5	1801.00	39.19	7.09	
1	41.10	9.00	901	1	901	901.00	38.44	6.34	
2	43.08	10.98	902	2	902	451.00	37.68	5.58	
3	43.60	11.50	903	3	903	301.00	37.24	5.14	
4	43.85	11.75	904	4	904	226.00	36.92	4.82	
5	44.05	11.95	905	5	905	181.00	36.68	4.58	
6	44.17	12.07	906	6	906	151.00	36.57	4.47	
8	44.37	12.27	908	8	908	113.50	36.4	4.30	
10	44.51	12.41	910	10	910	91.00	36.26	4.16	
12	44.64	12.54	912	12	912	76.00	36.15	4.05	
15	44.79	12.69	915	15	915	61.00	35.93	3.83	
20	44.98	12.88	920	20	920	46.00	35.82	3.72	
25	45.15	13.05	925	25	925	37.00	35.67	3.57	
30	45.30	13.20	930	30	930	31.00	35.45	3.35	
40	45.52	13.42	940	40	940	23.50	35.27	3.17	
50	45.69	13.59	950	50	950	19.00	35.11	3.01	
60	45.92	13.82	960	60	960	16.00	34.92	2.82	
80	46.35	14.25	980	80	980	12.25	34.67	2.57	
100	46.40	14.30	1000	100	1000	10.00	34.4	2.30	
120	46.45	14.35	1020	120	1020	8.50	34.2	2.10	
150	46.65	14.55	1050	150	1050	7.00	33.91	1.81	
180	46.85	14.75	1080	180	1080	6.00	33.69	1.59	
210	47.05	14.95							
240	47.10	15.00							
300	47.50	15.40							
360	47.68	15.58							

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.



**Figura 107** Recta de recuperación, pozo AVIT A

### 5.3.12.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación. se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 107. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(19.41 \text{ l/s} * 86.4)}{2.12 \text{ m}}$$

$$T = 144.76 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 61, vemos que el pozo AVIT A, se encuentra en un acuífero de media a alta capacidad para ceder agua, con caudales entre 10 a 50 l/s.

**Tabla 61** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

#### 5.3.12.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero b, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{144.76 \text{ m}^2/\text{día}}{29 \text{ m}}$$

$$K = 4.99 \text{ m/día}$$

**Tabla 62** Valores de la permeabilidad

<b>K (m/día)</b>	<b>Calificación estimada</b>
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

Comparando el resultado con la tabla 62, vemos que el pozo AVIT A, tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero bueno.

### **5.3.13. Prueba de bombeo: Pozo AVIT B**

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, Aunque existe un pozo cercano (AVIT A) a 30 m de distancia aproximadamente, según información del operador estos pozos no tienen conexión hidráulica.



**Figura 108** Pozo AVIT B

Se tuvo que ajustar la prueba de bombeo, de acuerdo a los horarios de funcionamiento establecidos por COSAALT R.L., esto con el fin de no perjudicar la dotación de agua potable durante el día.

**Tabla 63** Horario de funcionamiento pozo AVIT B

<b>Hora de encendido</b>	<b>Hora de apagado</b>
05:00 am	9:00 p.m.

Fuente: COSAALT R.L.

En base a este horario, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación durante el apagado de la bomba (9:00 p.m.), previo al apagado de la bomba, se registró el nivel dinámico (N.D.= 40.45 m), en una segunda fase se registró el bombeo programada con una hora de retraso (6:00 a.m.).



**Figura 109** Medición de la recuperación, pozo AVIT B

Al igual que el anterior, en este pozo se pudo aforar el caudal de bombeo ( $Q_b=7.9$  l/s) mediante un medidor de caudal que tiene instalado el pozo.

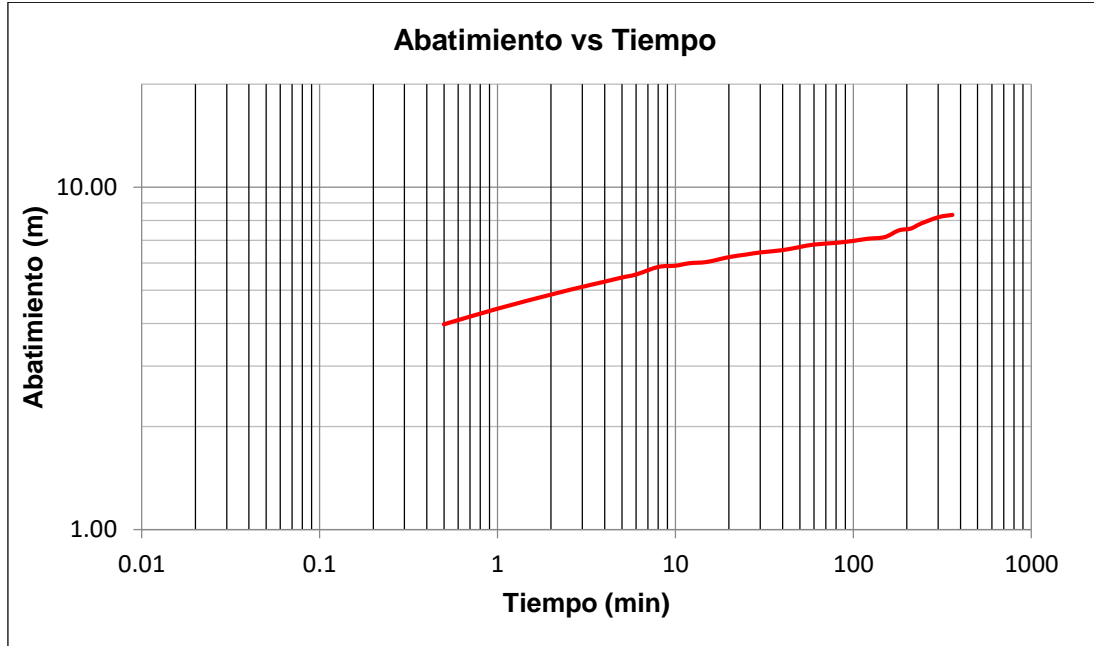


**Figura 110** Medidor de caudal, pozo AVIT B

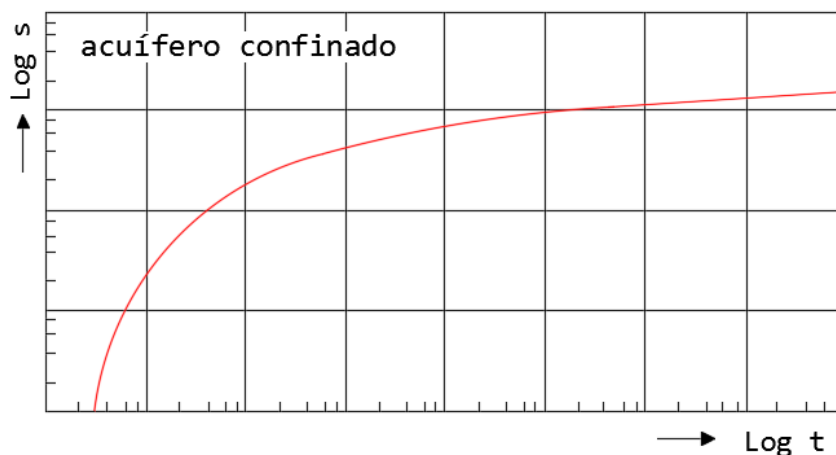
Los resultados de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

### **5.3.13.1. Interpretación de la prueba de bombeo**

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Abatimiento vs Tiempo, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.



**Figura 111** Curva abatimiento vs tiempo, pozo AVIT B



**Figura 112** Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero confinado.

### 5.3.13.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo 27 de mayo.

**Tabla 64** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo AVIT B

Información General			
<b>Nombre de pozo:</b>	AVIT B	<b>Profundidad del pozo:</b>	121 m
<b>Nivel Estático:</b>	31.5 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	35 m
<b>Nivel Dinámico:</b>	40.45 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	8 pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	7.9 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	34.5 m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	960 min	<b>Litología:</b>	Grava + Arena

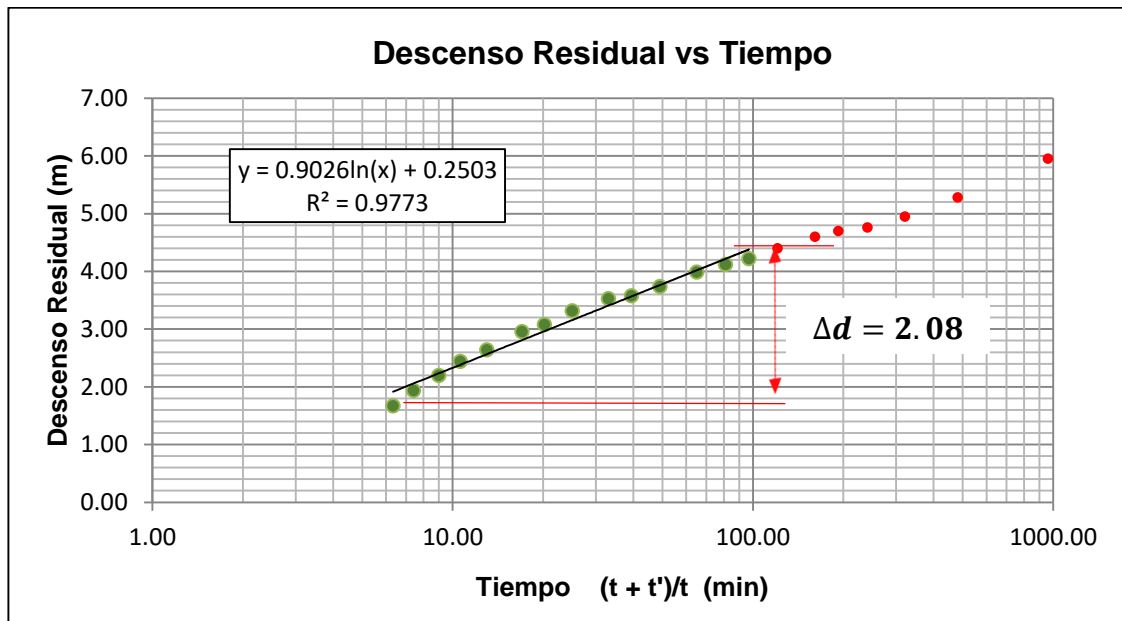


**Tabla 65** Cálculos de la prueba de bombeo y recuperación

BOMBEO			RECUPERACIÓN				Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (DR)
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t'	t + t'	(t + t')/t'		
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	31.55		960	0	960	0.00	40.45	8.95
0.5	35.53	3.98	960.5	0.5	960.5	1921.00	37.75	6.25
1	35.97	4.42	961	1	961	961.00	37.45	5.95
2	36.41	4.86	962	2	962	481.00	36.78	5.28
3	36.67	5.12	963	3	963	321.00	36.45	4.95
4	36.85	5.30	964	4	964	241.00	36.26	4.76
5	37.00	5.45	965	5	965	193.00	36.2	4.70
6	37.11	5.56	966	6	966	161.00	36.1	4.60
8	37.40	5.85	968	8	968	121.00	35.9	4.40
10	37.45	5.90	970	10	970	97.00	35.72	4.22
12	37.55	6.00	972	12	972	81.00	35.62	4.12
15	37.60	6.05	975	15	975	65.00	35.49	3.99
20	37.80	6.25	980	20	980	49.00	35.24	3.74
25	37.91	6.36	985	25	985	39.40	35.08	3.58
30	38.00	6.45	990	30	990	33.00	35.03	3.53
40	38.10	6.55	1000	40	1000	25.00	34.82	3.32
50	38.24	6.69	1010	50	1010	20.20	34.58	3.08
60	38.35	6.80	1020	60	1020	17.00	34.46	2.96
80	38.43	6.88	1040	80	1040	13.00	34.14	2.64
100	38.52	6.97	1060	100	1060	10.60	33.94	2.44
120	38.62	7.07	1080	120	1080	9.00	33.7	2.20
150	38.70	7.15	1110	150	1110	7.40	33.44	1.94
180	39.03	7.48	1140	180	1140	6.33	33.17	1.67
210	39.12	7.57						
240	39.38	7.83						
300	39.72	8.17						
360	39.85	8.30						

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima a el mismo.



**Figura 113** Recta de recuperación, pozo AVIT B

### 5.3.13.2.1. Cálculo de la Transmisividad ( $T$ )

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación, se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor  $Q$  (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 113. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el  $Q$  va en  $m^3/día$  y los descensos en metros, entonces la  $T$  saldrá en  $m^2/día$ .

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(7.90 \text{ l/s} * 86.4)}{2.08 \text{ m}}$$

$$T = 60.05 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 66, vemos que el pozo AVIT B se encuentra en un acuífero de baja capacidad para ceder agua, con caudales entre 1 a 10 l/s.

**Tabla 66** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

### 5.3.13.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b.

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

El espesor del acuífero b, fue obtenido del perfil litológico del pozo (ver Anexos G), en este caso fue asumido como la longitud total de filtros, por ser un acuífero multicapa.

$$K = \frac{60.05 \text{ m}^2/\text{día}}{29 \text{ m}}$$

$$K = 1.74 \text{ m/día}$$

Comparando el resultado con la tabla 67, vemos que el pozo AVIT B tiene una calificación estimada de media, con valores 1 a 10 m/día, considerándose como un acuífero regular a pobre.

**Tabla 67** Valores de la permeabilidad

K (m/día)	Calificación estimada
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

#### 5.3.14. Prueba de bombeo: Pozo ALBAT



**Figura 114** Pozo ALBAT

Al igual que en las pruebas anteriores, esta prueba se realizó únicamente con el registro de niveles en el pozo de bombeo, debido a que no se dispone de un pozo de observación.

Se tuvo que ajustar la prueba de bombeo, de acuerdo a los horarios de funcionamiento establecidos por COSAALT R.L., esto con el fin de no perjudicar la dotación de agua potable durante el día.

**Tabla 68** Horario de funcionamiento pozo ALBAT

<b>Hora de encendido</b>	<b>Hora de apagado</b>
08:00 am	9:00 p.m.

Fuente: COSAALT R.L.

En base a este horario, se programó la prueba para registrar inicialmente la recuperación, en coordinación con el operador del pozo se adelantó el apagado de la bomba (6:00 p.m.), previo al apagado de la bomba, se registró el nivel dinámico (N.D.= 42.38 m), en una segunda fase se registró el bombeo programada para el día siguiente (8:00 a.m.).



**Figura 115** Medición de la recuperación, pozo ALBAT

Al igual que el anterior pozo, el Caudal de bombeo ( $Q_b=6.03$  l/s) usado para la interpretación, fue aforado mediante el medidor de caudal instalado en el pozo.



**Figura 116** Medidor de caudal, pozo ALBAT

Lo resultados de esta prueba de bombeo, se presentan en ANEXOS F.

### 5.3.14.1. Interpretación de la prueba de bombeo

Primero se realizará la clasificación del acuífero en función a la gráfica Tiempo vs Abatimiento, obtenida de la prueba de bombeo, comparando con las gráficas de curvas típicas de Kruseman, esto con el fin de saber en qué tipo de acuífero se está trabajando.

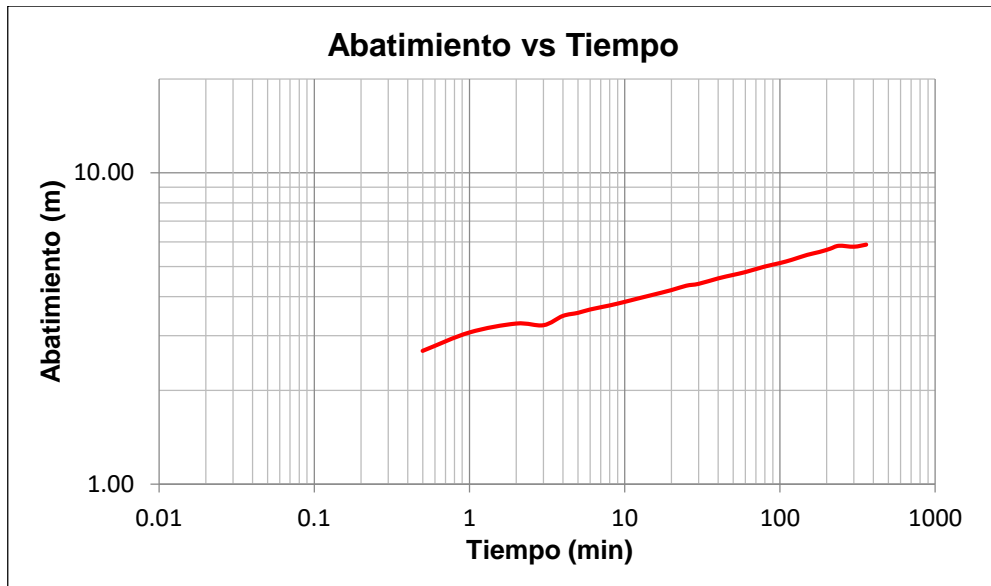


Figura 117 Curva abatimiento vs tiempo, pozo ALBAT

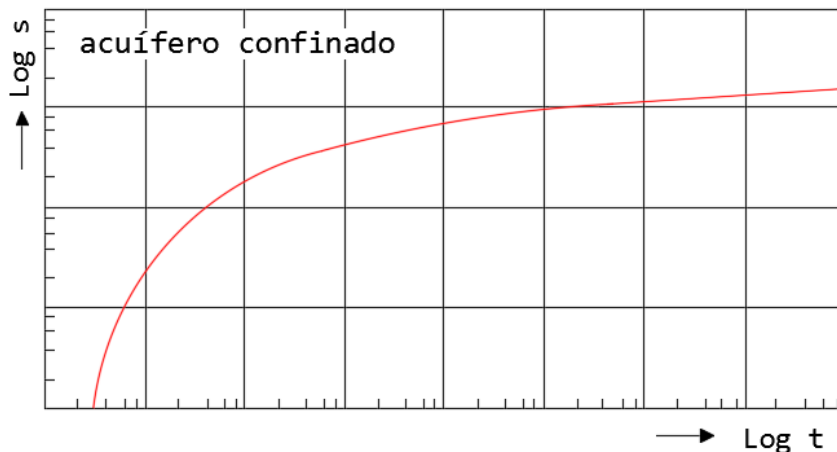


Figura 118 Curva típica de abatimiento-tiempo para acuífero confinado

Fuente. Adaptado de Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo (p.6), por Kruseman & De Ridder, 1970.

Comparando la curva obtenida Abatimiento-Tiempo, con las curvas típicas de kruseman para acuíferos confinados, semiconfinados y libres, se concluye que la curva se asemeja a un acuífero confinado.

### 5.3.14.2. Interpretación de la prueba de recuperación

Se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos en la prueba de recuperación, mediante el método de recuperación de Jacob.

A continuación, se presentan los datos y el cálculo de la transmisividad en el periodo de recuperación durante la prueba de bombeo realizada en el pozo 27 de mayo.

**Tabla 69** Características técnicas de la prueba de bombeo, pozo ALBAT

Información General				
<b>Nombre de pozo:</b>	ALBAT	<b>Profundidad del pozo:</b>	S/D	m
<b>Nivel Estático:</b>	36.4 m	<b>Profundidad de la bomba:</b>	S/D	m
<b>Nivel Dinámico:</b>	42.38 m	<b>Diámetro del pozo:</b>	S/D	pulgadas
<b>Caudal de Bombeo:</b>	6.03 l/s	<b>Longitud total de filtros:</b>	S/D	m
<b>Tiempo de bombeo:</b>	660 min	<b>Litología:</b>	S/D	

**Tabla 70** Cálculos de la prueba de bombeo y la recuperación

BOMBEO				RECUPERACIÓN				
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t'	t + t'	(t + t')/t'	Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (d <sub>R</sub> )
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
0	36.40		660	0	660	0.00	42.38	5.98
0.5	39.08	2.68	660.5	0.5	660.5	1321.00	39.11	2.71
1	39.47	3.07	661	1	661	661.00	38.96	2.56
2	39.68	3.28	662	2	662	331.00	38.81	2.41
3	39.64	3.24	663	3	663	221.00	38.72	2.32
4	39.87	3.47	664	4	664	166.00	38.68	2.28
5	39.95	3.55	665	5	665	133.00	38.62	2.22
6	40.04	3.64	666	6	666	111.00	38.58	2.18
8	40.15	3.75	668	8	668	83.50	38.52	2.12
10	40.25	3.85	670	10	670	67.00	38.47	2.07
12	40.34	3.94	672	12	672	56.00	38.43	2.03

BOMBEO			RECUPERACIÓN					
Tiempo	Nivel Dinámico	Abatimiento	tg	t'	t + t'	(t + t')/t'	Nivel Dinámico en ascenso	Descenso residual (d <sub>R</sub> )
(min)	(m)	(m)	(min)	(min)	(min)	(min)	(m)	(m)
15	40.45	4.05	675	15	675	45.00	38.39	1.99
20	40.60	4.20	680	20	680	34.00	38.33	1.93
25	40.74	4.34	685	25	685	27.40	38.27	1.87
30	40.80	4.40	690	30	690	23.00	38.24	1.84
40	40.98	4.58	700	40	700	17.50	38.15	1.75
50	41.10	4.70	710	50	710	14.20	38.13	1.73
60	41.20	4.80	720	60	720	12.00	38.1	1.70
80	41.40	5.00	740	80	740	9.25	38.05	1.65
100	41.53	5.13	760	100	760	7.60	37.98	1.58
120	41.66	5.26	780	120	780	6.50	37.95	1.55
150	41.85	5.45	810	150	810	5.40	37.9	1.50
180	41.97	5.57	840	180	840	4.67	37.85	1.45
210	42.10	5.70						
240	42.23	5.83						
300	42.19	5.79						
360	42.28	5.88						

Se representan en un gráfico semilogarítmico, los valores de  $d_R$  en ordenadas (escala métrica) y los de cada  $(t + t') / t'$  en abscisas (escala logarítmica).

Se ajusta una recta a los puntos obtenidos, esta recta suele presentar anomalías en su parte inicial, que es la de los valores de  $t'$  bajos y, por tanto, valores altos para  $(t + t') / t'$ , por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima al mismo.



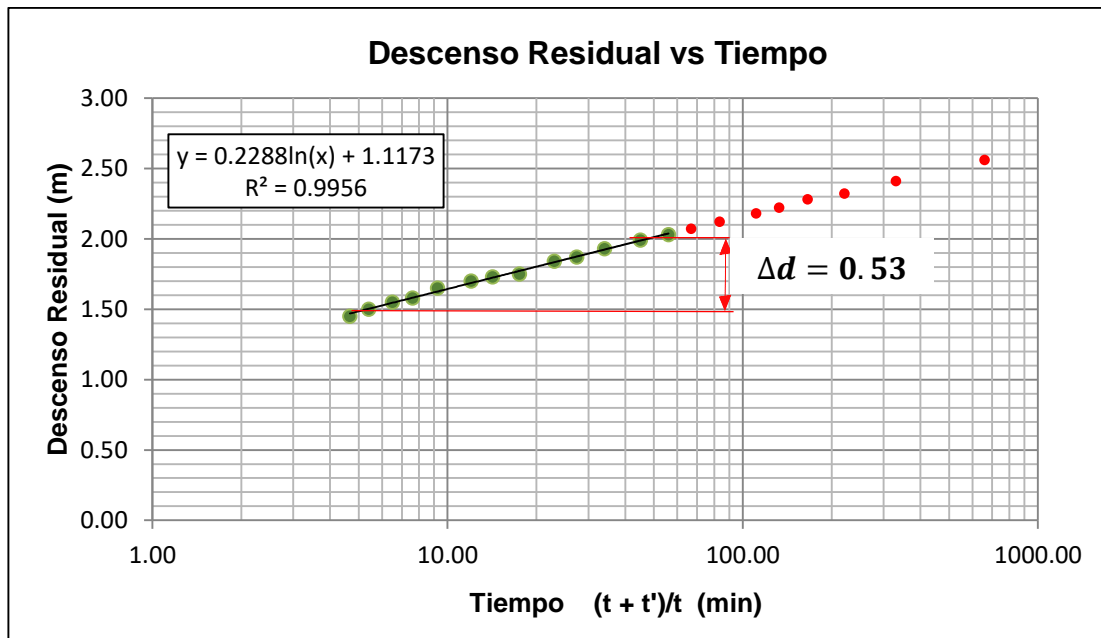


Figura 119 Recta de Recuperación, pozo ALBAT

#### 5.3.14.2.1. Cálculo de la Transmisividad (T)

La Transmisividad puede obtenerse en el análisis de la recuperación, se saca directamente de la pendiente de la recta, haciendo uso de la relación de Jacob:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta d}$$

El valor Q (caudal) lo conocemos y el valor  $\Delta d$  se calcula sobre el gráfico obteniéndolo de la recta ajustada, midiendo en el eje de ordenadas (descensos residuales) el valor resultante para un ciclo logarítmico tal como se indica en la figura 119. Para realizar los cálculos las unidades deben de ser homogéneas, por ejemplo: si el Q va en m<sup>3</sup>/día y los descensos en metros, entonces la T saldrá en m<sup>2</sup>/día.

En este caso el caudal está en l/s, por lo que lo multiplicamos por 86,4 para obtener el valor de la transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$$T = 0.183 \frac{(6.03/s * 86.4)}{0.53 \text{ m}}$$

$$T = 179.89 \frac{\text{m}^2}{\text{día}}$$

Comparando este resultado obtenido, con los valores de la Tabla 71, vemos que el pozo ALBAT, se encuentra en un acuífero de media a alta capacidad para ceder agua con caudales entre 10 a 50 l/s.

**Tabla 71** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martinez & Iglesias Lopez, 1984, IGME.

#### **5.3.14.2.2. Cálculo de la conductividad hidráulica (k)**

La conductividad hidráulica o permeabilidad (K), se obtiene como cociente entre la transmisividad T y el espesor del acuífero b. En este caso, no se pudo determinar la conectividad hidráulica debido a que se desconoce el espesor del acuífero, porque no se cuenta con perfil litológico, ni perfil de ubicación de filtros del pozo.

#### **5.4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)**

Como se mencionó anteriormente, no se pudo calcular de forma directa, el coeficiente de almacenamiento, debido a que en ningún pozo donde se realizaron las pruebas de bombeo disponen de un pozo de observación.

En este caso, cuando no se pueda calcular de manera directa el valor de S, (Villanueva M. & Iglesias L., 1984) recomienda adoptar un valor medio de S, presentados en la Tabla 72, valores obtenidos de mas de 500 ensayos de bombeo.

En este caso, conocemos la litología del acuífero, mediante los perfiles litológicos disponibles, así mismo por información geológica sabemos que el acuífero está compuesto por depósitos cuaternarios que generalmente están

compuestos por materiales porosos intergranular y también sabemos mediante la interpretación de las pruebas de bombeo su clasificación del acuífero, resultado aplicable la tabla 72.

**Tabla 72** Valores del coeficiente de almacenamiento

Tipo de material permeable	Forma del funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
<b>Kárstico:</b>		
Caliza y dolomías jurásicas.	Libre	$2 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$5 \times 10^{-5}$
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
<b>Poroso intergranular:</b>		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3}$
	Confinado	$10^{-4}$
<b>Kársticos y porosos:</b>		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

**Fuente.** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 23), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.

En la tabla 73 se presentan los valores de coeficiente de almacenamiento, adoptados para cada Pozo.

**Tabla 73** Valores de S adoptados, según su litología y grado de confinamiento

N°	Nombre del pozo	Clasificación del acuífero	Litología del acuífero	S Valor Medio
1	27 de mayo	Confinado	Grava fina + Arena	$10^{-4}$
2	Valle Hermoso	Confinado	Gravilla + Arena gruesa	$10^{-4}$
3	San Jorge II	Confinado	Grava arenosa	$10^{-4}$
4	Simón Bolívar (PN)	Semiconfinado	Grava + Arena	$10^{-3}$
5	Vela (Torrecillas)	Confinado	Gravilla + Arena	$10^{-4}$
6	San Salvador	Confinado	S/D	$10^{-4}$
7	San Jorge I (PN)	Semiconfinado	S/D	$10^{-3}$
8	Simón Bolívar (Antiguo)	Semiconfinado	Grava + Arena	$10^{-3}$
9	ANASPUGIO B	Confinado	S/D	$10^{-4}$

N°	Nombre del pozo	Clasificación del acuífero	Litología del acuífero	S Valor Medio
10	San Jerónimo (PN)	Confinado	S/D	10 <sup>-4</sup>
11	Luis Espinal B	Confinado	S/D	10 <sup>-4</sup>
12	AVIT A	Confinado	Gravas	10 <sup>-4</sup>
13	AVIT B	Confinado	Grava + Arena	10 <sup>-4</sup>
14	ALBAT	Confinado	S/D	10 <sup>-4</sup>

S/D: Sin Datos.

#### 5.4. RESULTADOS

En la tabla 74 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas.

**Tabla 74** Resultados de las pruebas de Bombeo

N°	Nombre del pozo	Clasificación del acuífero	Parámetros hidrogeológicos		
			T (m <sup>2</sup> /día)	K (m/día)	S
1	27 de mayo	Confinado	220.75	7.36	10 <sup>-4</sup>
2	Valle Hermoso	Confinado	58.69	2.67	10 <sup>-4</sup>
3	San Jorge II	Confinado	90.74	3.56	10 <sup>-4</sup>
4	Simón Bolívar (PN)	Semiconfinado	35.38	1.37	10 <sup>-3</sup>
5	Vela (Torrecillas)	Confinado	104.63	7.47	10 <sup>-4</sup>
6	San Salvador	Confinado	130.2	3.62	10 <sup>-4</sup>
7	San Jorge I (PN)	Semiconfinado	73.22	-	10 <sup>-3</sup>
8	Simón Bolívar (Antiguo)	Semiconfinado	69.1	2.67	10 <sup>-3</sup>
9	ANASPUGIO B	Confinado	146.47	3.12	10 <sup>-4</sup>
10	San Jerónimo (PN)	Confinado	98.78	3.29	10 <sup>-4</sup>
11	Luis Espinal B	Confinado	356.67	7.93	10 <sup>-4</sup>
12	AVIT A	Confinado	144.76	4.99	10 <sup>-4</sup>
13	AVIT B	Confinado	60.05	1.74	10 <sup>-4</sup>
14	ALBAT	Confinado	179.89	-	10 <sup>-4</sup>

## **CAPÍTULO 6**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Si se desea tener un adecuado conocimiento del comportamiento del agua subterránea, es conveniente tener presente que para una adecuada evaluación e interpretación de los datos procesados es imprescindible correlacionar estos con otros antecedentes del área bajo estudio, tales como la geología, suelos, topografía, clima, hidrología, uso de suelo y vegetación.

#### **6.1. MAPAS PIEZOMÉTRICOS**

A partir de la interpretación del mapa piezométrico, es posible analizar el comportamiento del agua subterránea obteniendo la siguiente información: dirección del flujo, gradiente del agua subterránea y áreas de recarga y descarga.

##### **6.1.1. Dirección de flujo en la zona de estudio**

Analizando el mapa piezométrico (Fig.120) del mes de agosto 2021, se puede apreciar, que el agua del acuífero fluye en sentido de mayor nivel piezométrico a menor nivel piezométrico.

La dirección principal de flujo en la zona norte del área de estudio, es desde el Noroeste (Rincón de La Victoria) y Noreste (Monte Sud) hacia la parte centro del acuífero en estudio (zona urbana).

En la zona central, la dirección del flujo, es desde el Suroeste (zona de recarga de serranía de Sama) y Noreste (zona de recarga serranía Gamoneda) hacia el centro, condicionado por la topografía, pero también, se puede ver que en la zona central dichas direcciones están inducidas por la explotación del acuífero mediante los pozos en los alrededores, esto porque no todas las direcciones en la zona central, siguen la dirección del agua superficial ni están inducidas por la topografía.

En la zona sur, más propiamente en zona de San Luis la dirección del flujo, van desde Noreste (Torrecillas) y Suroeste (embalse san Jacinto) hacia el sur (Angosto de San Luis), esto debido a la posible existencia de falla

geológica en la zona del portillo y afloramiento de rocas duras en la zona (ver Anexos).

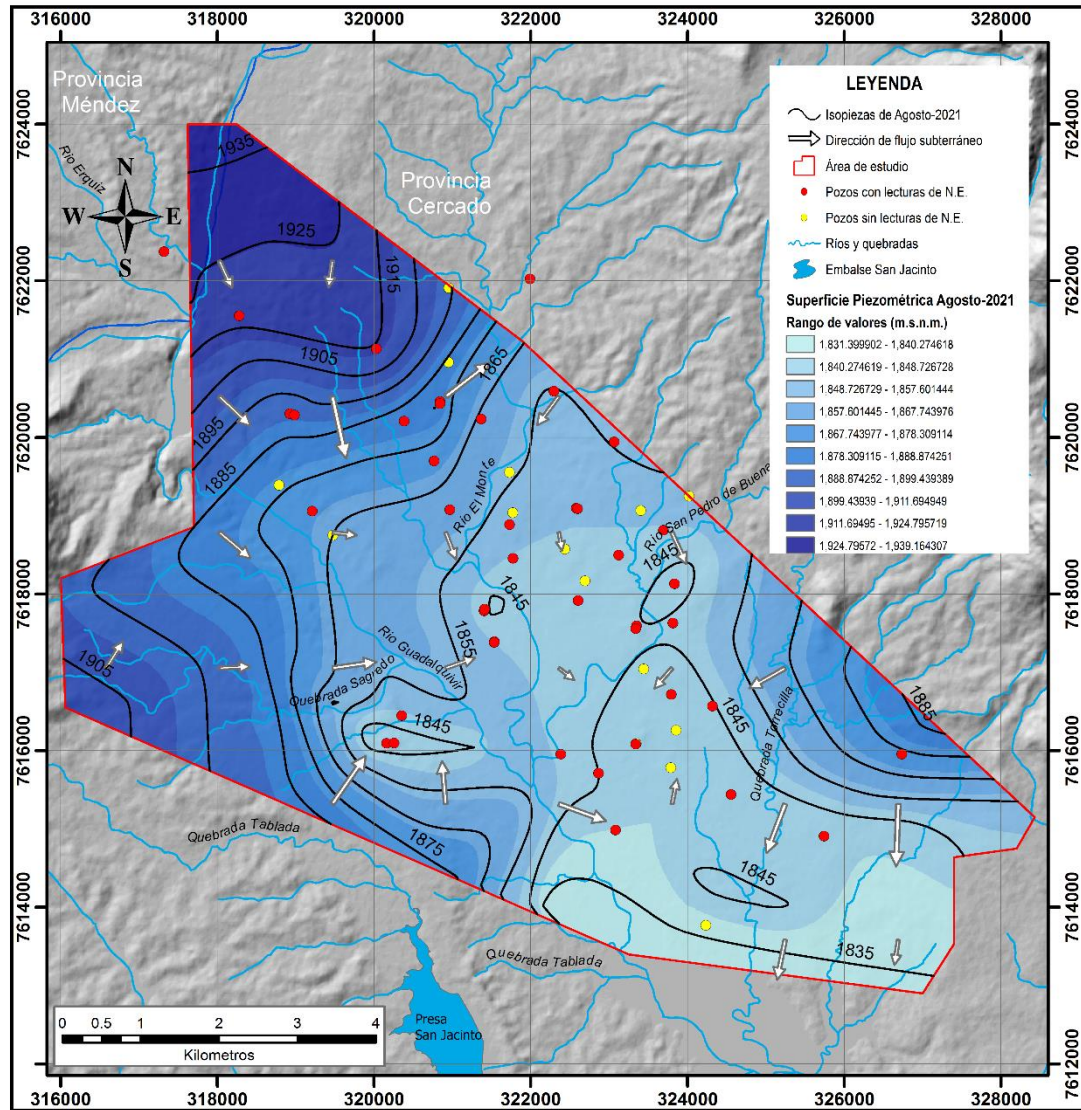


Figura 120 Mapa piezométrico Agosto-2021

### 6.1.2. Gradiente Hidráulico del agua subterránea

Mediante el análisis de las curvas de isopiezas, es posible determinar el gradiente hidráulico, cuyo valor adimensional se determina sobre un eje de flujo en los mapas piezométricos mediante la fórmula:

$$I = (H_1 - H_2) / L$$

H1 y H2 representan los valores de los niveles piezométricos sobre las curvas de isopiezas y L, la distancia entre curvas que se calcula según la escala del mapa.

Analizando los mapas piezométricos (Fig. 120), obtenidos del área de estudio, se pueden localizar zonas en el que el espaciado de las curvas de isopiezas aumentan, más propiamente en la zona centro y sur del área de estudio, esto es debido a que el gradiente hidráulico decrece, la permeabilidad o transmisividad crece, el caudal unitario crece, considerándose estas zonas ideales para perforación de pozos que pueden ser usados para el suministro de agua.

Al Noroeste, Oeste y Sureste del área de estudio se pueden localizar zonas en el que, el espaciado de las curvas de isopiezas disminuyen, esto significa que el gradiente hidráulico aumenta, la permeabilidad o transmisividad decrece, el caudal unitario decrece, considerándose estas zonas no ideales para la perforación de pozos.

### **6.1.3. áreas de recarga y descarga.**

Los mapas piezométricos permite determinar las zonas de recarga y descarga distribuidos en el área de estudio, el espaciado de las curvas de isopiezas varía según la dirección de flujo, esta variación está en función del gradiente hidráulico.

De esta forma en los mapas de superficies piezométricas, las zonas de recarga se presentan como abombamientos de la superficie piezométrica o mantos divergentes y por tanto de concavidad orientada hacia arriba y con débil espaciado

Dentro de los mapas obtenidos de superficies piezométricas del área de concesión de COSAALT R.L. no se presentan zonas con características típicas de zonas de recarga, esto debido a los depósitos fluviolacustres que se encuentran en la superficie del área de estudio, siendo estos depósitos de permeabilidad mala.

A su vez las zonas de descarga se mostrarán en el mapa, como depresiones de la superficie piezométrica o mantos convergentes y el nivel de base de flujo subterráneo por la cota piezométrica más baja.

Dentro de los mapas de superficies piezométricas del área de estudio, no existen zonas con características de típicas descargas naturales, pero si se ve, formaciones de conos de abatimiento producto de la descarga por pozos de bombeo.

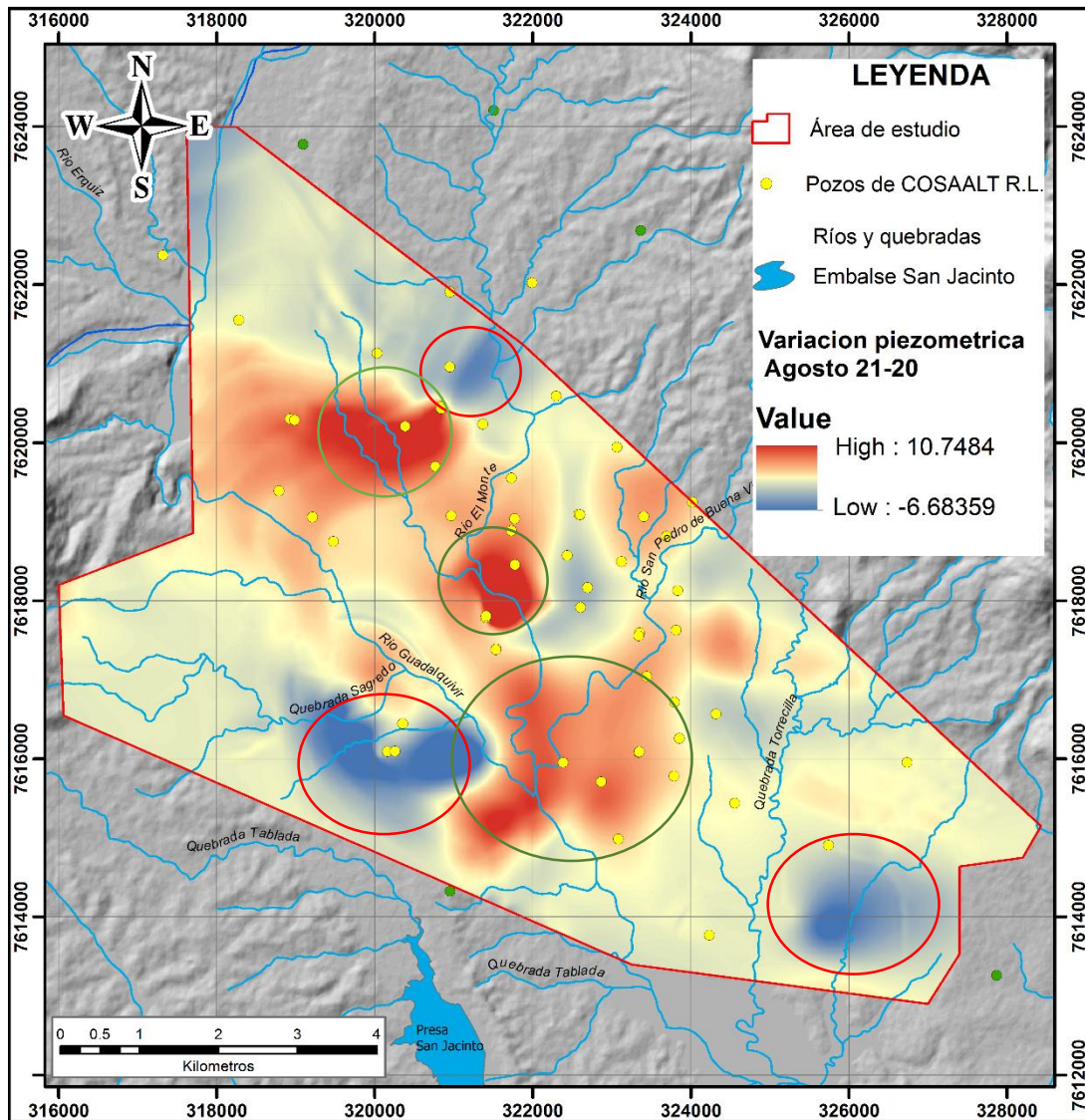
#### **6.1.4. Análisis de variación de nivel piezométrico en el tiempo**

Una vez obtenidas las superficies piezométricas, se hace un análisis de las variaciones, en el tiempo y espacio de los niveles piezométricos calculadas anualmente , estas variaciones son calculadas determinando la diferencia en metros que se presenta en cada uno de los pozos de la red de monitoreo, no solo indican las áreas donde se presentan los descensos, los cuales corresponderían a los valores negativos o abatimientos, sino también los valores positivos que nos indican los puntos de ascenso del nivel de agua o recuperaciones del nivel piezométrico. Se hará el análisis para los meses de agosto 2020 y 2021, este último se lo considera el más representativo del comportamiento subterráneo reciente.

En la figura 121 se presenta un mapa obtenido mediante algebra de mapas en ArcGis y representa la diferencia de la superficie piezométrica de Agosto 2021 y Agosto 2020, que representa las diferencias de los niveles piezométricos en cada uno de los pozos de la red de monitoreo de COSAALT, medida y calculada entre Agosto 2021 y 2020, se encuentra que las principales variaciones se registran en seis puntos de la gráfica, señalada en la figura 121, con círculos rojos y verde, que indican sectores de abatimiento y recuperación del nivel del agua subterránea, y en el resto del área las diferencias son muy bajas, es decir casi no se presenta variación. Lo que significa, que entre agosto 2020 y 2021, se presenta en el sector suroeste (San salvador), oeste (Villa Busch) y al norte (valle Hermoso), un abatimiento del

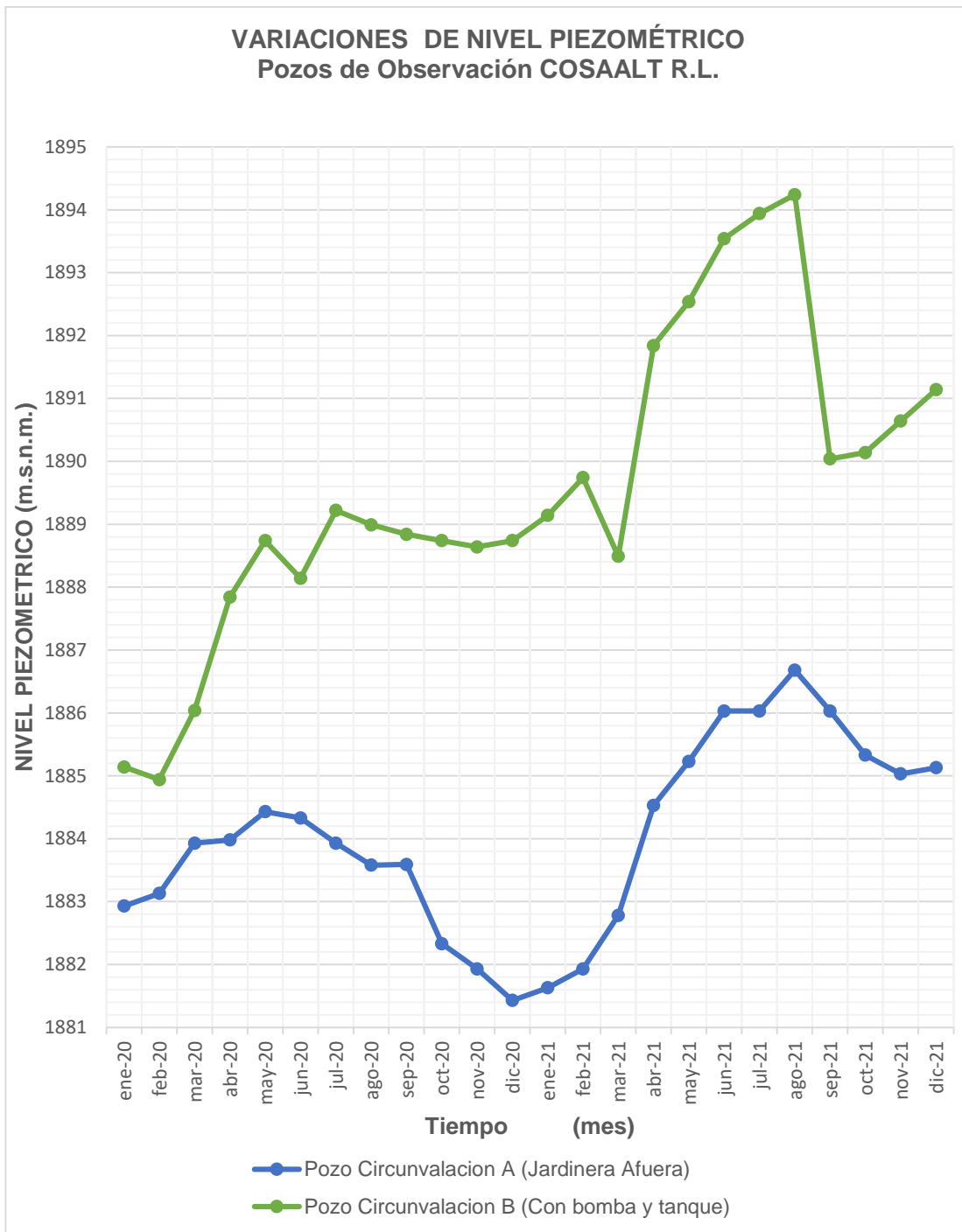


orden de 6.68 metros de profundidad, tal como se indica en la escala de la derecha y tres sectores donde se presentan recuperación del nivel piezométrico de 10.74 m, correspondiente al sector centro y norte.

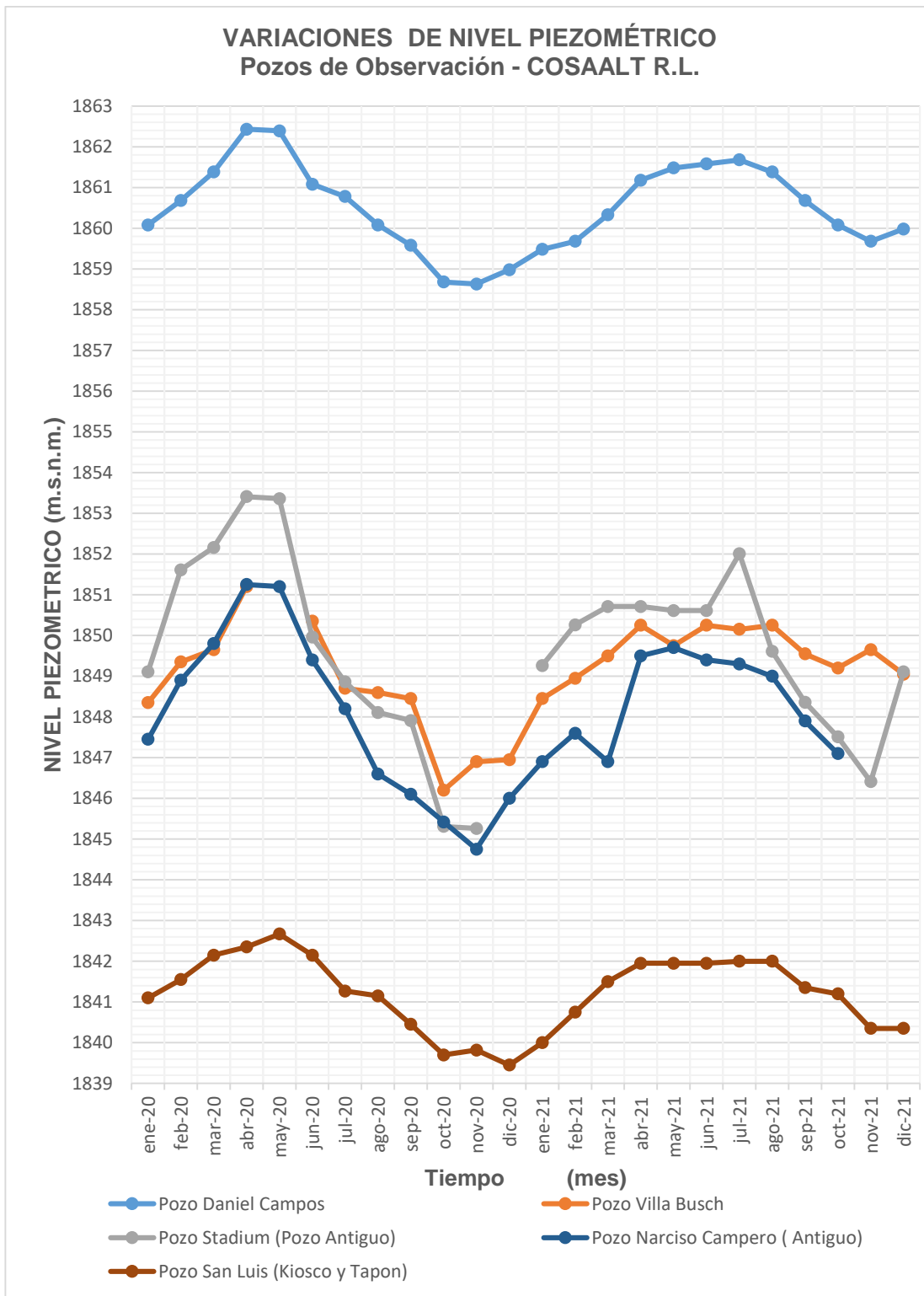


**Figura 121** Diferencia o variación de nivel piezométrico entre Agosto 2021 - 2020

La figura 122, el Hidrograma representa la variación piezométrica del pozo Circunvalación A y B, ubicado al noroeste del área de estudio, se evidencia que durante el año 2020 al 2021 presenta una recuperación natural del nivel piezométrico del mes de enero 2020 al mes de diciembre 2021, de 2 y 5 metros aproximadamente, del mes de agosto 2020 al agosto 2021.



**Figura 122** Variación de Niveles Piezométricos, pozos de observación COSAALT R.L



**Figura 123** Variación de Niveles piezométricos descenso y recuperación

En la figura 123, los niveles piezométricos muestran descenso selectivo, es decir que solo algunos pozos sufrieron descensos de hasta 7 m con respecto a las mediciones 2020, coincidente la ubicación de estos pozos con aquellos pozos que hacen un uso intensivo del recurso para satisfacer las demandas que requiere la población.

## 6.2. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Los resultados de las pruebas de bombeo son presentados en la Tabla 74, de los 14 pozos donde se realizó las pruebas de bombeo ,11 pozos están captando agua del acuífero confinado y 3 pozos (Simón Bolívar PN, Simón Bolívar Antiguo y San Jorge I) están captando de un acuífero semiconfinado (ver fig.124).

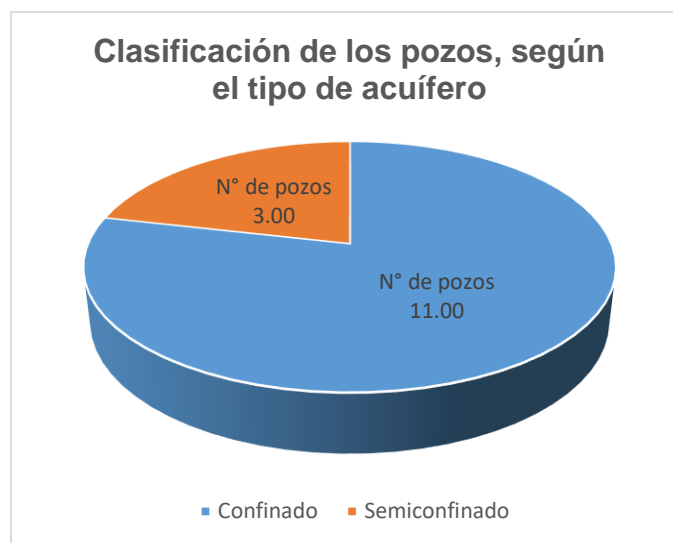


Figura 124 Clasificación de los pozos, según el tipo de acuífero

### 6.2.1. Transmisividad

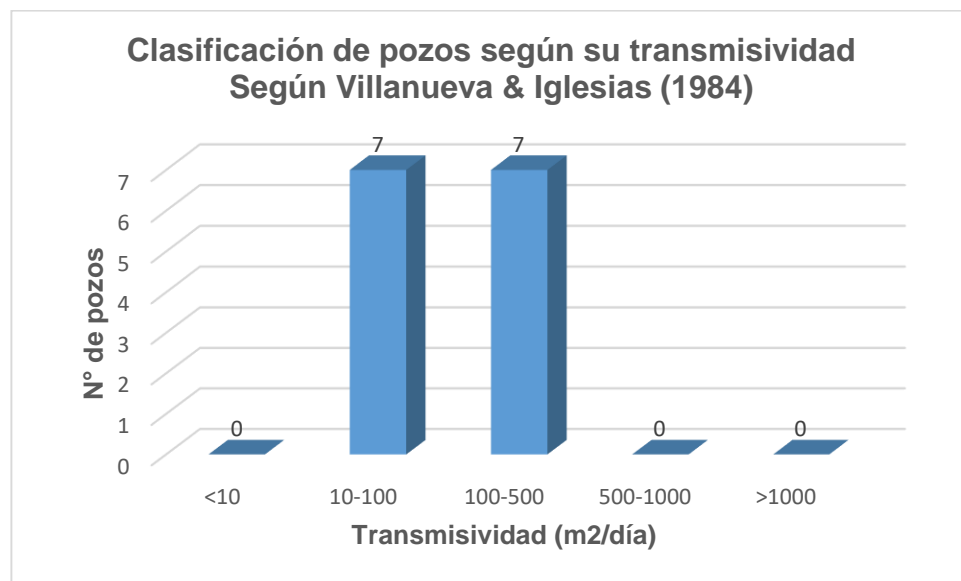
El rango de valores de transmisividad obtenidos de la prueba de recuperación, es de 35.38 m<sup>2</sup>/día (pozo Simón Bolívar (PN)) y 356.67 m<sup>2</sup>/día (pozo Luis Espinal B), comparando los resultados obtenidos con la tabla 75, vemos que 7 pozos, tienen valores que están entre 10 a 100 m<sup>2</sup>/día, los cuales tienen una calificación estimativa de baja, con posibilidades de extraer caudales entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica, y 7 pozos con valores

entre 100 a 500 m<sup>2</sup>/día, con una calificación estimativa de media a alta, con posibilidades de extraer entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica (Ver fig. 125).

**Tabla 75** Valores de la transmisividad

T(m <sup>2</sup> /día)	Calificación estimativa	Posibilidades del acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 a 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

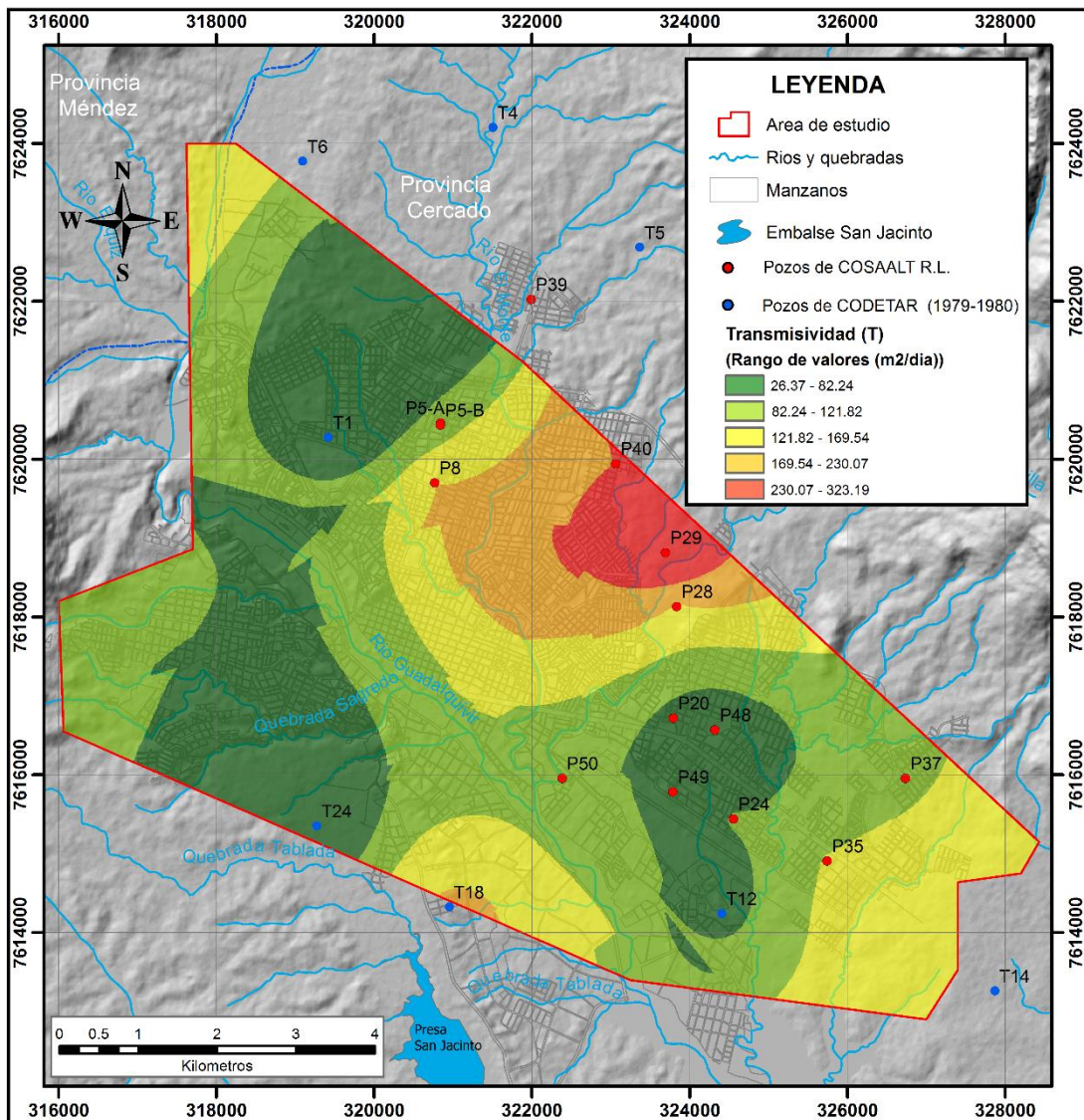
**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 21), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.



**Figura 125** Clasificación de los pozos según su transmisividad (según Villanueva & Iglesias, 1984)

En la figura 126, se presenta el mapa de transmisividad elaborado con los resultados obtenidos en las pruebas de recuperación y complementando en las zonas sin información, con datos del proyecto de CODETAR 1979-1980.





**Figura 126** Mapa de Transmisividad del área en estudio

En la figura 127, se presenta este mapa reclasificado en función a la tabla 75, según Villanueva e Iglesias (1984), donde se puede observar que en el área de estudio existen 2 zonas principales, la primera zona donde la transmisividad varia de 10 a 100 m<sup>2</sup>/día y la segunda zona donde la transmisividad varia de 100 a 500 m<sup>2</sup>/día.

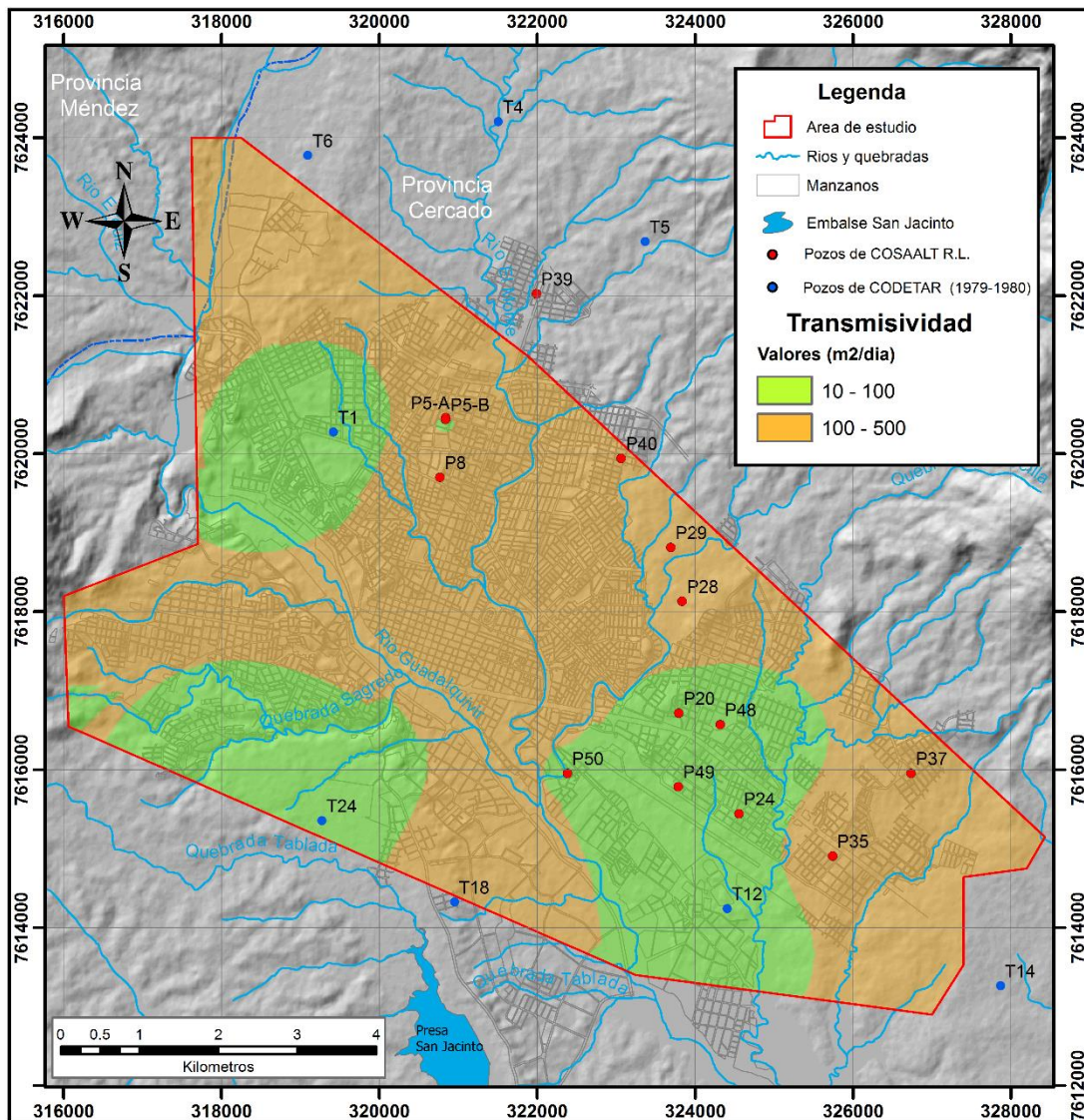


Figura 127 Mapa de transmisividad reclasificado, según Villanueva & Iglesias, 1984

### 6.2.2. Conductividad Hidráulica o permeabilidad

Los valores de permeabilidad o conductividad hidráulica deducidos de los valores de transmisividad, teniendo en cuenta el espesor del acuífero varían entre 1.37 m/día (pozo Simón Bolívar PN) y 7.93 m/día (pozo Luis Espinal B), con un valor promedio de 4.14 m/día para los 14 pozos.

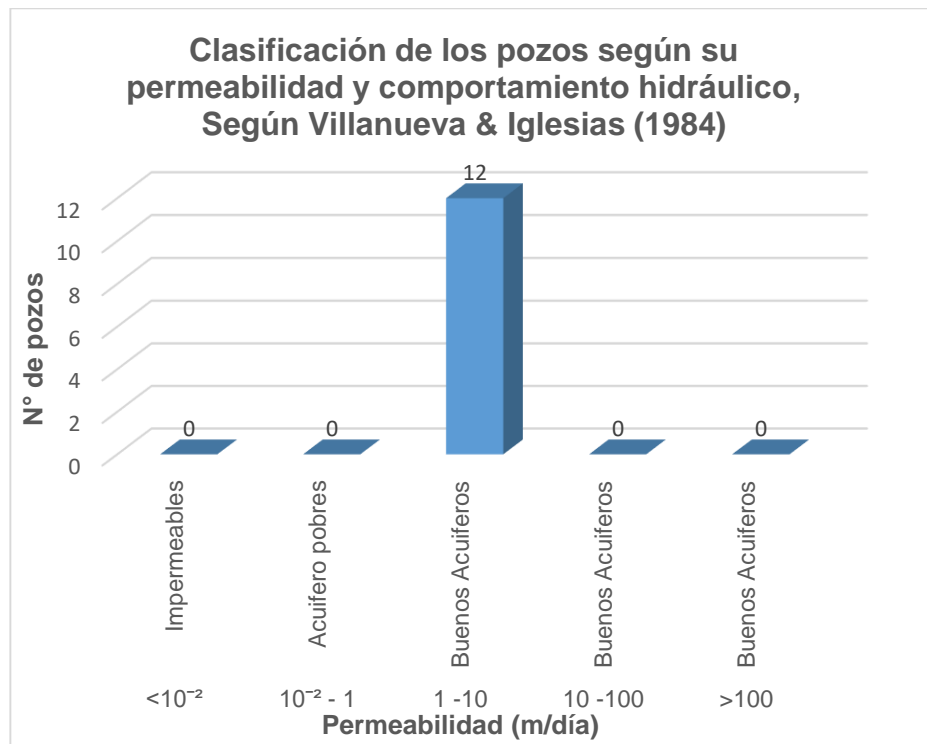
Comparando estos resultados con la tabla 76, vemos que todos los valores se encuentran entre el rango mayor a 1 y menores a 10 ( $1 < K < 10$ ),

teniendo una calificación estimada de media, considerándose al acuífero explotado como bueno (ver fig.128).

**Tabla 76** Valores de la permeabilidad

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

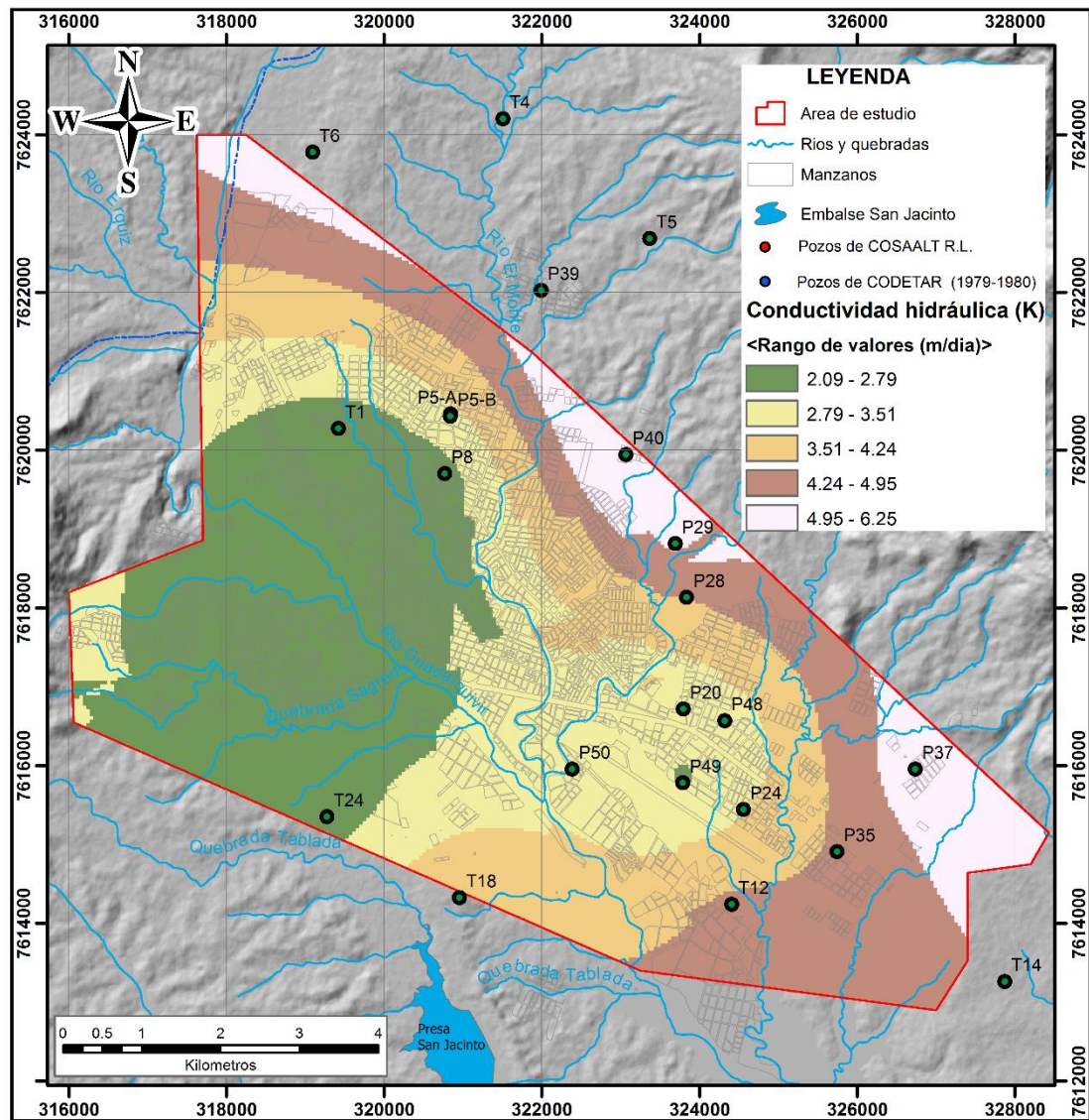
**Fuente:** Adaptado de Pozos y acuíferos “Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo” (p. 22), por Villanueva Martínez & Iglesias López, 1984, IGME.



**Figura 128** Clasificación de los pozos según su permeabilidad y comportamiento hidráulico, Según Villanueva & Iglesias, 1984

En la figura 129, se presenta el mapa de conductividad hidráulica elaborado con los resultados obtenidos y con datos de apoyo del proyecto de investigación de CODETAR 1979-1980 para cubrir las zonas que no se tiene información.





**Figura 129** Mapa de permeabilidad o conductividad hidráulica del área de estudio

En la figura 130, se presenta este mapa reclasificado en función a la tabla 76, según Villanueva e Iglesias (1984), donde se puede observar que en el área de estudio solo existe 1 zona, en esta zona la permeabilidad varía de 1 a 10 m/día, por lo cual, se considera que toda el área de estudio se encuentra en un acuífero bueno para la perforación de nuevos pozos.

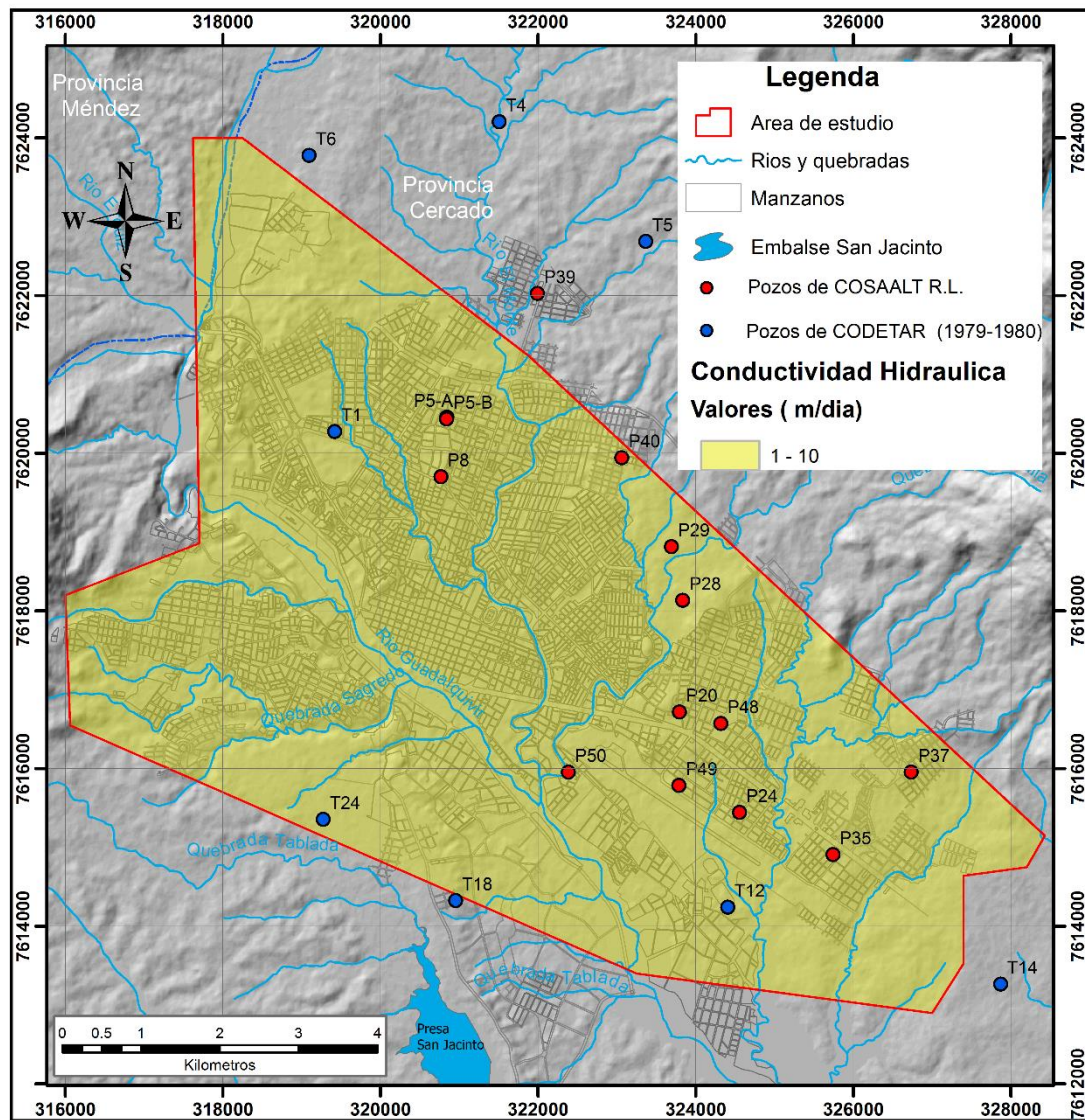


Figura 130 Mapa de Conductividad Hidráulica, reclasificado según Villanueva & Iglesias, 1984

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **7.1. CONCLUSIONES**

En conclusión, se logró construir 19 mapas piezométricos, 7 en el año 2020 y 12 para el 2021 pero el mapa más representativo en la última gestión es el mapa piezométrico del mes de agosto por tener más información de lecturas de niveles estáticos que fueron transformados a niveles piezométricos y trazados en un mapa de isopiezas.

También se logró realizar 18 pruebas de bombeo, de las cuales fueron descartadas 4, por datos no confiables, esto debido a varias situaciones presentadas al momento de realizar las pruebas, dando malos resultados.

La información de niveles en pozos de observación dentro del área en estudio es escasa, la mayor parte de los pozos utilizados como pozos de monitoreo son pozos que están en pleno funcionamiento, esto limita a cualquier estudio piezométrico realista.

Los mapas piezométricos obtenidos, muestran variaciones en la piezométrica con respecto al tiempo y espacio, identificando zonas de abatimiento coincidentes con los pozos de funcionamiento continuo, haciendo ver que existe una sobreexplotación del acuífero y zonas de recuperación natural del nivel piezométrico debido a la recarga del acuífero.

Las direcciones de flujo no sufren muchas variaciones en todo el año a excepción de la zona donde se concentran la mayoría de los pozos, en esta zona la dirección de flujo está inducida por el bombeo de los pozos.

Con el análisis e interpretación de pruebas de recuperación, se logró calcular los parámetros hidrogeológicos de 14 pozos subterráneos que están bajo la concesión de COSAALT R.L., a pesar de tener muchas limitaciones en el desarrollo de las pruebas de bombeo y recuperación, sobre todo por los tiempos cortos en el registro de los descensos durante el bombeo y ascensos en la recuperación.

Los resultados obtenidos de los parámetros hidrogeológicos, son considerados como aceptables y pueden ser de gran utilidad para futuras investigaciones en el tema de aguas subterráneas.

Según la clasificación de los resultados obtenidos de la transmisividad y conductividad hidráulica, nos dice que el acuífero es bueno para la explotación del recurso subterráneo.

## **7.2. RECOMENDACIONES**

Sería recomendable, que para la realización de campañas de monitoreo de niveles piezométricos, realizar la suspensión temporal (mínimo de 24 horas antes) de todos los pozos que se encuentren dentro del área de influencia de cada uno de los pozos usados como red de Monitoreo, esto con el fin de evitar el bombeo un día antes de la medición y así garantizar que los niveles de agua en los pozos, correspondan con los niveles estáticos y no niveles dinámicos por bombeo, debido a la cercanía de varios pozos que encuentran en la zona de estudio.

Así mismo es importante recomendar, que a esta red de monitoreo se la debe referenciar sobre unas placas de concreto debidamente, niveladas y georreferenciadas, con cotas al nivel del mar (m.s.n.m.), para que el cálculo de niveles piezométricos, este siempre, bajo parámetros uniformes a la realidad y cumpliendo las especificaciones técnicas de una red de monitoreo de este tipo.

Se recomienda, para futuros trabajos de investigación realizar una investigación de campo que permita determinar las causas de variación de niveles en los pozos Circunvalación B, Narciso Campero (Pozo Antiguo), Stadium B y Circunvalación A, pozos que están ubicado en una zona donde el acuífero tiene el mismo comportamiento.

También sería recomendable la realización de estas campañas de monitoreo de niveles piezómetros mediante convenios interinstitucionales, con entidades públicas o privadas relacionadas con el recurso hídrico, para tener

una mayor cantidad de información que permitan analizar la variabilidad piezométrica con mayor precisión.

Para el caso de la prueba de bombeo y pruebas de recuperación, sería recomendable realizar las mismas, cumpliendo los tiempos de duración mínimos recomendables para su realización, previo apagado de la bomba 24 horas antes de la prueba, esto con el fin de tener información más confiable para su interpretación.

Así mismo, es recomendable mejorar el sistema de bombeo en los pozos, para realizar una adecuada prueba de bombeo, esto implica en cambiar válvulas de paso, válvulas de retención, habilitar las tuberías de desagüe, instalar instrumento de medición de caudales, colocar tuberías para introducir el zonda, cierre perimetral, etc.