

**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
**“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”**



**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y  
METALURGIA**

**ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**CONSIDERACIONES TÉCNICAS QUE INFLUYEN  
EN LA CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE AGUA Y  
PIEZÓMETROS EN LA MINERA BARRICK  
MISQUICHILCA SAC. 2014**

**Para optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO DE MINAS**

**Presentado por:**

**Bach. GALLUPE TÁMARA, JOSÉ LUIS**

**Asesor:**

**MSc. Ing. TORRES YUPANQUI, LUIS ALBERTO**

**HUARAZ – PERÚ  
2018**

A mis padres por su  
esfuerzo, dedicación y  
apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi profundo agradecimiento a las Autoridades de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" y de un modo muy especial a las autoridades de la Facultad de Ingeniería de Minas Geología y Metalurgia, así como también a los docentes de dicha facultad por haberme impartido sus valiosas enseñanzas durante mi formación como ingeniero de minas.

A mis familiares más cercanos quienes supieron comprender y valorar el trabajo que había emprendido para alcanzar los objetivos que me propuse de ser un profesional egresado de esta alma mater, y ser un digno representante como profesional.

**JOSÉ L. GALLUPE T.**

## RESUMEN

El presente trabajo Monográfico de ingeniería, muestra los procedimientos técnicos de ingeniería para instalaciones de los pozos de agua y piezómetros en minería a cielo abierto, teniendo en cuenta las características geológicas para realizar la perforación, consideración técnica para el diseño de piezómetros y finalmente la instalación y construcción con cálculos reales de materiales.

En la actualidad las perforaciones tanto para investigación como para producción se le denominan **sondeos** dentro de los cuales están las perforaciones profundas es decir perforaciones para la instalación de pozos de producción de petróleo, pozos de agua y piezómetros.

Del mismo modo se realiza una presentación de los diferentes tipos de perforadoras y sus respectivas características de diseño. Así mismo se verifica los aditivos utilizados.

Del mismo modo, se describe la importancia de la construcción de piezómetros, cálculos de aditivos y materiales, teniendo en cuenta los datos tomados en el momento de la perforación como son el logeo y el caudal de agua, estos datos

son de vital importancia para realizar un diseño del piezómetro indicando el mayor caudal y proceder a su instalación y construcción respectiva.

**PALABRA CLAVE.**

Consideraciones técnicas que influyen en la construcción de pozos de agua y piezómetros en Minera Barrick Misquichilca SAC - 2014

## **INTRODUCCION**

El presente trabajo monográfico de ingeniería describe los procedimientos para la perforación de pozos de agua y piezómetros por el método de rotación con circulación invertida (RC), estos piezómetros serán empleados para el diseño, instalación y construcción de pozos de agua y de piezómetros; estos sirven para medir el nivel freático, conocer las características hidrodinámicas del acuífero, muestreo hidrogeoquímico del agua, toma de muestras de calidad de agua en el caso de minería a cielo abierto.

Es necesario entonces conocer la metodología del control y manejo adecuado del factor Hídrico en Mina, tanto en operaciones subterráneas como en operaciones a cielo abierto, tiene siempre una gran importancia, para el desarrollo normal y responsable de las diversas actividades mineras.

Siendo entonces de necesidad continua evaluar, monitorear y controlar los flujos superficiales y subterráneos, es necesario realizar proyectos y planes que conlleven al normal cumplimiento de estos objetivos, tanto a mediano como largo plazo, dentro de estos planes deberá estar previsto la construcción de piezómetros y pozos de agua.

El trabajo monográfico se divide en cinco capítulos:

- En el **Capítulo I** titulado Generalidades, se describe: Ubicación, Accesibilidad, morfología, clima y geología de la Mina Pierina para luego detallar el procedimiento descrito en la monografía.
- En el **Capítulo II** titulado Fundamentación, se describe: todos los términos que se usan dentro de la monografía en base a textos científicos y modelos matemáticos a usar, explicando de una manera fácil y detallada este último.
- En el **Capítulo III** titulado Metodología, se describe: la razón por la cual se eligió el tema de la monografía, el problema y el diseño de investigación del trabajo de una manera justificada.
- En el **Capítulo IV** titulado Resultado de la Investigación, se describe: el procedimiento de perforación, diseño, instalación y construcción de pozos de agua y piezómetros en la mina Pierina.
- En el **Capítulo V** titulado Conclusiones y recomendaciones, donde se da a conocer las conclusiones y recomendaciones del proyecto de investigación.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

INTRODUCCION

### CAPÍTULO I GENERALIDADES

<b>1.1. ENTORNO FÍSICO.</b> .....	11
1.1.1. UBICACIÓN:.....	11
1.1.2. ACCESOS.....	12
1.1.3. CLIMA .....	13
<b>1.2. ENTORNO GEOLÓGICO.</b> .....	13
1.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL .....	13
1.2.2. GEOLOGÍA LOCAL .....	15
1.2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL:.....	15
1.2.4. GEOLOGÍA ECONÓMICA.....	16

### CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN

<b>2.1. MARCO TEÓRICO.</b> .....	18
2.1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
2.1.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....	18

2.1.3. AGUA SUBTERRÁNEA. ....	21
2.1.4. PARAMETROS HIDROGEOLOGICOS .....	28
2.1.5. MOVIMIENTO DEL AGUA ATRAVES DEL SUELO.....	38
2.1.6. PIEZÓMETROS .....	42
2.1.7. SISTEMAS DE PERFORACIÓN.....	48
2.1.8. PERFORACIÓN DE POZOS DE AGUA. ....	49
2.1.9. PROPIEDADES FÍSICAS DEL MACIZO ROCOSO .....	51
2.1.10. MÉTODOS DE PERFORACIÓN PARA SONDEOS.....	57
2.1.11. SELECCIÓN DE EQUIPOS DE PERFORACIÓN .....	70
2.1.12. LODOS DE PERFORACIÓN. ....	77

### **CAPÍTULO III METODOLOGÍA**

<b>3.1. EL PROBLEMA</b> .....	98
3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	98
3.1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	98
3.1.3. OBJETIVOS .....	99
3.1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	99
3.1.5. LIMITACIONES. ....	100
<b>3.2. HIPÓTESIS</b> .....	100
<b>3.3. VARIABLES.</b> .....	101
<b>3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	101
3.4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	101
3.4.2. POBLACIÓN Y MUESTRA. ....	101
3.4.3. TÉCNICAS, INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE DATOS. ..	102
3.4.4. FORMA DE TRATAMIENTO DE LOS DATOS .....	102

### **CAPÍTULO IV RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN**

<b>4.1. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN, DISEÑO, INSTALACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE AGUA Y PIEZOMETROS</b> .....	103
4.1.1. PREPARACIÓN DE LA PLATAFORMA DE PERFORACIÓN, TRASLADO E INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE PERFORACIÓN:.....	103

4.1.2. PUNTOS DE PERFORACIÓN.....	104
4.1.3. INSTALACIÓN DE LOS TUBOS DEL PIEZÓMETRO.....	109
4.1.4. CONSTRUCCION DE POZOS DE AGUA .....	119
<b>4.2. APOORTE DEL TESISISTA.....</b>	<b>129</b>

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

<b>5.1. CONCLUSIONES .....</b>	<b>130</b>
<b>5.2. RECOMENDACIONES:.....</b>	<b>131</b>

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

**ANEXOS**

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1. ENTORNO FÍSICO.**

##### **1.1.1. UBICACIÓN:**

###### **1.1.1.1. Política:**

La Mina Pierina propiedad de Minera Barrick Misquichilca S. A., se ubica políticamente al noroeste de la ciudad de Huaraz, en los distritos de Jangas e Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Ancash.

###### **1.1.1.2. Geográfica:**

Geográficamente la mina Pierina se ubica en la cordillera negra en el callejón de Huaylas y las coordenadas geográficas promedio se reflejan en el siguiente cuadro.

**Tabla N° 01.** Coordenadas Geográficas de la Mina Pierina

<b>SUR</b>	<b>OESTE</b>	<b>ALTITUD (m.s.n.m.)</b>
9°27'33"	77°35'15"	3700 – 4320

### 1.1.1.3. Coordenadas UTM:

El sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (U.T.M.) de la mina Pierina en el datum WGS84 se muestran en el siguiente cuadro.

**Tabla N° 02.** Coordenadas U.T.M. de la Mina Pierina

<b>ZONA</b>	<b>COORDENADAS U.T.M. (Datum WGS84)</b>		
	<b>VÉRTICE</b>	<b>NORTE</b>	<b>ESTE</b>
<b>18</b>	1	8956024.73	215954.71
	2	8954237.61	216791.86
	3	8951889.00	216398.45
	4	8951054.60	214707.66
	5	8952329.51	213482.31
	6	8954199.49	215133.52

### 1.1.2. ACCESOS.

El acceso a la mina Pierina donde se realizaron la perforación para la construcción de piezómetros se realiza de la siguiente manera:

**Tabla N° 03.** Acceso a la Mina Pierina.

<b>TRAMO</b>	<b>CARRETERA</b>	<b>DISTANCIA (Km)</b>
Lima - Pativilca	Asfaltado	197.00
Desvío Pativilca - Huaraz	Asfaltado	209.00
Huaraz - Jangas	Asfaltado	18.40
Jangas – Mina Pierina	Afirmado	18.60

**Fuente:** Datum. Google Earth 2016.

### **1.1.3. CLIMA**

El lugar donde se ubica la mina Pierina experimenta un clima estacional con inviernos muy secos y veranos relativamente lluviosos. Las temperaturas máximas y mínimas fluctúan entre 14.9 y -11.7 °C. La dirección predominante para los vientos ligeros (menos de 3 m/s) se da desde el sur. Los vientos más fuertes muestran una predominante dirección norte.

## **1.2. ENTORNO GEOLÓGICO.**

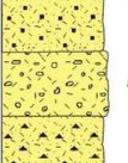
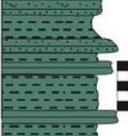
### **1.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL**

El depósito de Pierina se ubica en el lado oriental de la Cordillera Negra, que está conformada por sedimentos del Jurásico Superior al Cretáceo Superior (margas, pizarras, calizas, y clásticos continentales) que tienen una potencia total de más de 5.50km. Los sedimentos están cubiertos por material volcánico del Grupo Calipuy (andesitas, dacitas y riocitas). En la Tabla N° 04 se muestra una columna estratigráfica generalizada de la Cordillera Negra.

En la Cordillera Negra, el volcánico Calipuy alberga depósitos minerales de plata, plomo, zinc, cobre y oro controlados estructuralmente. Los depósitos

están asociados con un cinturón de alteración hidrotermal de 70 km de longitud, que corre paralelo al valle del Río Santa y que muestra una tendencia noroeste. La mineralización ocurre principalmente en vetas y en yacimientos menores de alteración, confinados entre estructuras que muestran una tendencia noreste y este- oeste que intersectan las estructuras dominantes cuyo rumbo es noroeste. La Mina Santo Toribio, ubicada a unos 4 km. al sur de Pierina, explotó uno de los yacimientos más importantes de ese tipo en el área.

**Tabla N° 04.** Columna Estratigráfica Generalizada de la Cordillera Negra

Eratema	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica	Espesor (m)	Columna	Descripción Litológica
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO				Depósitos aluviales, coluviales, fluviales, fluvio-glaciares.
		PLEISTOCENO				
	NEÓGENO	PLIOCENO	Grupo Lloclla	300		Depósitos fluvio-glaciares, con clastos de rocas intrusivas y volcánicas. ----- DISCORDANCIA EROSIONAL -----
			Fm. Fortaleza	700		Intercalaciones de tobas de cristales ricos en cuarzo y tobas liticas. ----- DISCORDANCIA ANGULAR Y EROSIONAL -----
		MIOCENO	Formación Calipuy Superior			Tobas ----- LIGERA DISCORDANCIA ANGULAR -----
		PALEÓGENO	OLIGOCENO	Grupo Calipuy	1200 - 3000	
	Intercalaciones de lavas y tobas					
	EOCENO				Intercalaciones de aglomerados, brechas y tobas	
	PALEOCENO					Intercalaciones de lavas y tobas ----- DISCORDANCIA ANGULAR -----
	MESOZOICO	CRETÁCICO	SUPERIOR	Grupo Casma	300	
INFERIOR			Fm. Carhuaz	400		Secuencias de areniscas grises intercaladas con lutitas y limoarcillitas rojizas.
		Fm. Santa	50		Niveles de caliza	
		Fm. Chimú	350-800		Secuencias de arenisca cuarzosa blanca con estratificación cruzada, niveles superiores presenta conglomerados de arenisca cuarzosa blanca.	
		Fm. Oyón	100		Areniscas en capas delgadas intercaladas con capas de carbón y restos de plantas.	
JURÁSICO		SUPERIOR	Grupo Chicama	600		Secuencias de areniscas grises y blancas intercaladas con lutitas y niveles de carbón. Presenta resto de plantas fósiles.

## **1.2.2. GEOLOGÍA LOCAL**

El yacimiento Pierina es algo singular en el área, por tratarse de un depósito de oro en un sistema sulfato ácido, previamente desconocidos en la región.

A unos 1.5 km al oeste del Tajo Pierina, se ubica calizas con colores que tienen tonalidad gris a beige, alrededor de la caliza hacia el suroeste del tajo Pierina, aflora ampliamente la Fm. Carhuaz, formada por areniscas sucias y limolitas arenosas.

Esta formación presenta colores grises a gris oscura a negro, cuando están alterados por procesos hidrotermales tienen colores rojizo, cremosa a amarillo ocre.

Las estructuras dominantes en el área muestran una tendencia norte a noroeste, oeste a noroeste y noreste.

## **1.2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL:**

### **1.2.3.1. Geodinámica Interna**

En la mina Pierina, la geodinámica interna está definida con la formación y comportamiento de las fallas Tinyash y Roxana. Sus movimientos de rumbo han ocasionado la formación de las estructuras de cizalla: Katty y Torta; y a través de estas estructuras, la mineralización del yacimiento Pierina.

Posteriormente, por efecto de los últimos movimientos inversos, ocurridos en las fallas Tinyash, Roxana y las estructuras de cizalla, expusieron y ocasionaron deslizamientos de bloques a través de las fallas Milagros y Azucena.

### **1.2.3.2. Falla Roxana**

En la caja techo de la falla Roxana se ha determinado varias estructuras de arrastre que son ondulaciones oblicuas con la cresta aguda dirigida hacia

el noreste, similares estructuras se han ubicado en bancos superiores tanto en material argílico como en la alteración cuarzo – alunita. La presencia de estas estructuras es prueba evidente de dirección y sentido de movimientos, en este caso de movimientos inversos tanto en la fallas Roxana y Katty.

#### **1.2.3.3. Fallas Milagros.**

En el sector sur del tajo, se ha mapeado decenas de fallas subparalelas de movimientos normales, rumbos predominante SW- NE y buzamientos hacia SE, esta dirección de buzamiento nos indica el sentido de movimiento de los bloques o dirección de debilidad. Similar a las fallas Azucena, estas han servido y sirven como planos de deslizamientos de megabloques en bancos de minado.

### **1.2.4. GEOLOGÍA ECONÓMICA**

#### **1.2.4.1. Alteración.**

La alteración en Pierina es típicamente de un proceso hidrotermal de alta sulfuración.

El 95% de la mineralización en Pierina está oxidada, diseminada en la vuggy sílica, cuarzo alunita y alunita arcilla en menor proporción. En las partes inferiores del yacimiento tenemos ensambles de sulfuros: Pirita – Enargita – Covelita - Azufre nativo.

#### **1.2.4.2. Mineralización.**

En muestras de mano, solo se observa: Cuarzo, Especularita, Adularia (raro), Pirita, fluorita y calcita. En cortes pulidos se aprecia oro en tamaños entre 4 y 10  $\mu\text{m}$ .

La mineralización aurífera se presenta albergada principalmente en la toba pomácea riódacítica. La mineralización se caracteriza por la presencia de sílice porosa, rodeada de alteración cuarzo - alunítica e ilítica externa (arcilla). En la toba sobreyacente se observa la presencia de una alteración similar, que excluye la sílice porosa y que presenta una mineralización en la forma de vetillas cuyo espesor varía entre algunas micras y un centímetro. La andesita basal se caracteriza por presentar una alteración de caolinita - pirita, también confinada en vetillas.

La mineralización aurífera ocurre en la toba pomácea en intervalos verticales de más de 260 m. Se estima que el área mineralizada tiene aproximadamente 300 m de ancho y 900 m de largo. El contenido más elevado de oro y plata (más de 8 g/t de oro y hasta 300 g/t de plata) se presenta en general, en las rocas ubicadas en el extremo norte del yacimiento. La ley promedio de las reservas del depósito es de 2.71 g/t de oro y 21.34 g/t de plata.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTACIÓN**

#### **2.1. MARCO TEÓRICO.**

##### **2.1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.**

En relación al trabajo de investigación monográfico de ingeniería relacionado a la construcción de pozos de agua y piezómetros, no se ha realizado estudio alguno, porque a medida que la mina es explotada a través del planeamiento de minado, se originan nuevos frentes de explotación y esto conlleva a la inestabilidad de las labores mineras superficiales, razón que el presente es un trabajo inédito, con la aplicación del método de perforación rotativo y el método rotopercutivo.

##### **2.1.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS**

- **ACCIDENTE.** Acto por el cual una persona sufre algún tipo de lesión, que inclusive puede causar la muerte.

- **ESTRATIFICACIÓN.** Disposición paralela o subparalela que toman las capas de las rocas sedimentarias, durante su sedimentación.
- **ESTRATO.** Es la roca formada por la sedimentación de fragmentos o partículas provenientes de la desintegración de las rocas pre-existentes.
- **ESTRUCTURA.** Esta referido a la disposición, arreglo y cohesión de los materiales constituyentes de un determinado cuerpo rocoso.
- **EXFOLIACIÓN.** Propiedad de las rocas de separarse en forma de láminas, cuando se refiere a minerales es sinónimo de clivaje.
- **GRANULOMETRÍA.** Tecnología que se encarga de dictar normas correspondientes para determinar las dimensiones y las formas de los fragmentos de los materiales detríticos.
- **GRAVEDAD.** Es la fuerza de atracción que ejerce la tierra sobre los cuerpos que se ubican en la superficie terrestre.
- **INCIDENTE.** Acto por el cual se produce el deterioro de equipos, maquinarias, materiales y/o insumos.
- **MACIZO.** Término usado en geotecnia para referirse a áreas rocosas cuyo núcleo está constituido de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.
- **MUESTRA.** Pedazo de roca o mineral, de un tamaño y peso adecuado que pueda servir de elemento del cual se pueda obtener toda la información necesaria para realizar un estudio propuesto.

- **PLASTICIDAD.** Propiedad de las rocas de deformarse al recibir un esfuerzo conservando la deformación al cesar el esfuerzo.
  
- **POROSIDAD.** Es la relación existente entre el volumen de los intersticios porosos y el volumen total de la roca o suelo. La porosidad se expresa siempre en porcentaje.
  
- **SUELO.** Cobertura superficial de la corteza terrestre producto de la alteración de los minerales de las rocas pre-existentes. La formación del suelo implica la meteorización química de los minerales primarios dando lugar a nuevos minerales.
  
- **TEXTURA.** Tamaño, forma y disposición de los minerales componentes de las rocas.
  
- **NIVEL DE AGUA:** Profundidad (m) a la que se encuentra el nivel superior del agua subterránea (medida desde la superficie), de acuerdo a la medición efectuada con instrumentos específicos (Sonda Eléctrica u otros).
  
- **NIVEL FREÁTICO:** Nivel superior de la zona de saturación del agua subterránea en las rocas permeables. Este nivel puede variar estacionalmente, a causa de las precipitaciones, la evaporación y la descarga mediante filtraciones y/u obras antrópicas.
  
- **PERFORACIÓN:** Es la realización de un taladro de forma cilíndrica que atraviesa el terreno donde se hace, el terreno puede ser no consolidado, consolidado o roca. Su propósito es el de abrir en terreno huecos cilíndricos destinados a alojar a uno o varios piezómetros en cada uno de ellos, se basa en principios mecánicos de percusión y rotación, cuyos efectos producen la trituración y pulverización de la roca en un área proporcional al diámetro de la broca.

- **CAUDAL:** Cantidad de agua u otra sustancia que mana o corre, sus unidades son dadas por unidades de volumen entre una unidad de tiempo.
- **MATERIALES INERTES:** Los materiales inertes incluyen bentonita, cemento en polvo, arena y/o grava lavada con agua fresca. Los materiales inertes no incluyen sacos de plástico, papel, cartón ó cualquier tipo de basura, ni suelo orgánico, turba, detritos de la perforación del taladro mismo, relaves del proceso de flotación, rípios de mineral lixiviado ni detritos de roca desmonte.

### 2.1.3. AGUA SUBTERRÁNEA.

- *Según Dr. Rolando Carrascal Mirando, comenta:*

“Es el agua existente bajo la superficie del terreno. Es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturando completamente los poros y fisuras del terreno”.<sup>1</sup>

Este agua fluye a la superficie de forma natural a través de manantiales, áreas de rezume, cauces fluviales, o bien directamente al mar. Puede también dirigirse artificialmente a pozos, galerías y otros tipos de captaciones.

Cuando se perfora un pozo a suficiente profundidad, se hallará de un cierto tiempo agua, la cual subirá hasta cierto nivel. Este de equilibrio donde la presión hidrostática en el agua iguala a la presión atmosférica; tiene una serie de denominaciones, entre superficie freática, tabla del agua subterránea, nivel freático, superficie libre de agua o capa freática.<sup>2</sup>

---

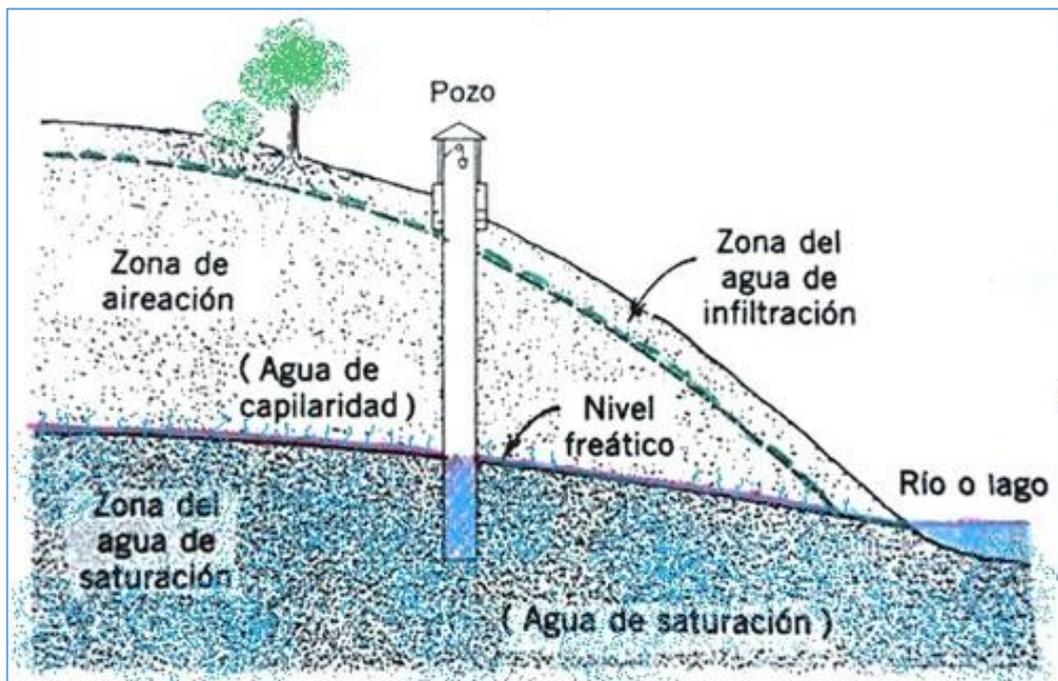
<sup>1</sup> Dr. Rolando Carrascal, Cartografía Hidrogeológica, Escuela Geológica FIGMM - UNI, Lima – Perú, 2008.

<sup>2</sup> CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. (2001). Hidrología Subterránea. Segunda Edición. Ed. Omega. Barcelona.

Entonces la superficie freática representa el lugar geométrico de los puntos de la masa de agua donde la presión es igual a la presión atmosférica, es decir:

$$P \text{ nivel de agua} = P \text{ atmosférica}$$

**Figura N° 01.** Flujo de agua subterránea.



**Fuente.** A. N. Strahler, Geografía Física, 3ra Edición, 1983

Al mismo tiempo mencionar que el desplazamiento de las aguas subterráneas se realiza de las siguientes maneras:

### 2.1.3.1. DESPLAZAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS:

- **Movimiento descendente:** Infiltración

*Según Máximo Villon Bejar; comenta:*

“La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en las capas superiores del suelo, mientras que la percolación es el movimiento del agua en las capas del subsuelo”.<sup>3</sup>

*Según Máximo Villon Bejar; comenta:*

“La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en las capas superiores del suelo, mientras que la percolación es el movimiento del agua en las capas del subsuelo”.

Los cursos fluviales que circulan en regiones con clima seco y que fluyen sobre planicies cuyo substrato está formado por arenas y gravas, pierden su caudal por infiltración a lo largo de su lecho. Esta agua recarga el acuífero y este tipo de corriente se le conoce como influente.

- **Movimiento ascendente:** Ascensión capilar o capilaridad.

En regiones de clima húmedo donde el nivel freático es elevado y cuya agua se dirige hacia el cauce, el río recibe el agua de saturación denominada corriente efluente, descargando así agua del acuífero.<sup>4</sup>

Si el nivel del agua superficial está por encima del nivel freático, (influyente) se produce un aporte a las aguas subterráneas, por el contrario, si el nivel de las aguas superficiales, está por debajo del nivel freático (efluente), se produce un aporte a las aguas superficiales, es por esto que se tienen las corrientes perennes, a pesar de que no se produzca precipitación.

---

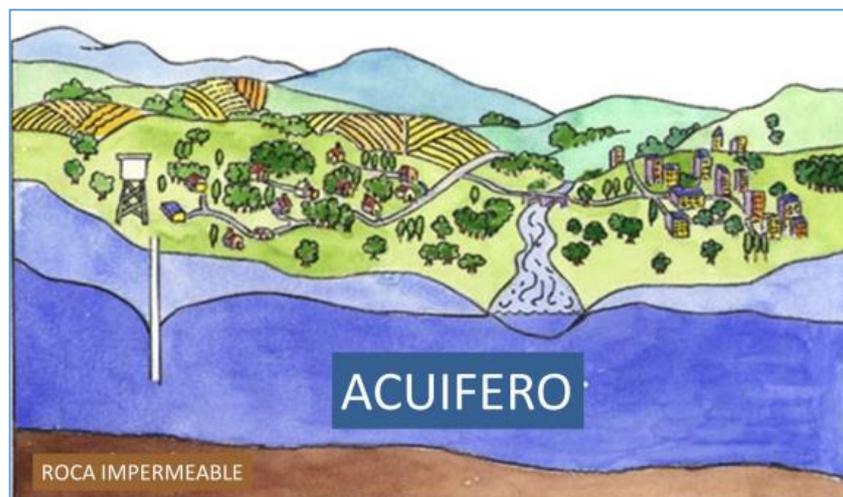
<sup>3</sup> Máximo Villon, Fundamentos de Hidrología, 2da Edición, Lima – Perú, 2002.

<sup>4</sup> A.N. Strahler, The Earth Sciences, 2da Edición, 1971

### 2.1.3.2. CLASIFICACIÓN DE AGUAS SUBTERRANEAS.<sup>5</sup>

- a. **Acuífero:** Un acuífero es un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua. El agua subterránea que se halla almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico. Se han realizado estudios que permiten calcular que aproximadamente el 30 por ciento del caudal de superficie proviene de fuentes de agua subterránea.

Figura N° 02. Acuífero



Fuente: [www.oldsaybrookct.org/Pages/OldSaybrookCT\\_APA/index](http://www.oldsaybrookct.org/Pages/OldSaybrookCT_APA/index)

- b. **Acuitardo:** Formación geológica de baja permeabilidad que almacena agua pero la transmite con mucha dificultad. No es posible su explotación directa en forma económica, pero puede recargar, por flujo vertical inducido a otros acuíferos (explotación indirecta). *Ejemplos:* Arcillas limosas o arenosas.

Es una formación geológica semipermeable, que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas

<sup>5</sup> Juan J. Ordoñez Galvez, Aguas Subterráneas-Acuíferos SENAMHI, 1era Edición, Lima – Perú, 2011

subterráneas, sin embargo bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos.

- c. **Acuicludo:** Es una formación geológica poco permeable, que conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite, por lo tanto no es posible su explotación. Generalmente los acuicludos son depósitos subterráneos de arcilla.
- d. **Acuífugo:** Es una formación geológica subterránea que se caracteriza por ser impermeable, por tanto, es incapaz de absorber o transmitir agua.

### 2.1.3.3. CLASIFICACIÓN DE LOS ACUÍFEROS:

Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad. Se caracteriza, por poseer una permeabilidad significativa y una extensión y espesor considerables. Constituyen almacenes de enormes reservas que pueden ser utilizadas, mediante obras de captación.<sup>6</sup>

- a. **Acuíferos libres.** Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es la procedente del drenaje de sus poros.

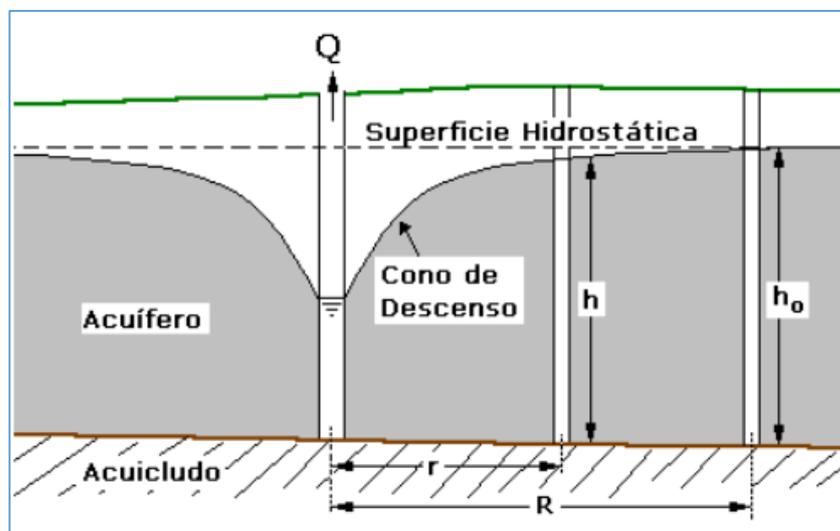
También llamados no confinados o freáticos. Entre ellos existe una superficie libre y real del agua almacenada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático se encuentra la zona no saturada. La superficie hasta donde llega el agua, se denomina superficie freática; cuando esta

---

<sup>6</sup> Juan J. Ordoñez Gálvez, Aguas Subterráneas-Acuíferos SENAMHI, 1era Edición, Lima – Perú, 2011

superficie es cortada por un pozo se habla de nivel freático en ese punto.

**Figura N° 03.** Acuífero Libre

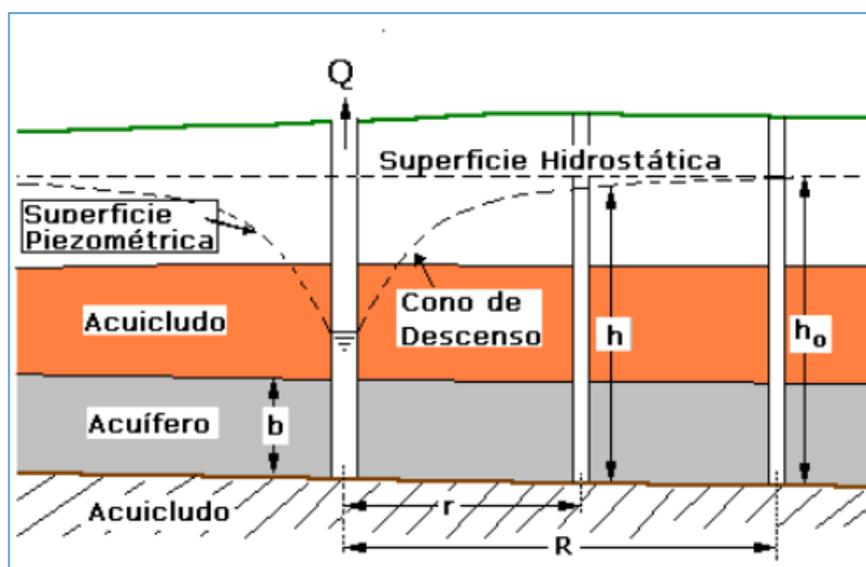


**Fuente:** Hidrología e hidráulica aplicadas-aguas subterráneas –IMFIA 2008

- b. Acuíferos confinados.** Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos.

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).

**Figura N° 04.** Acuífero confinado



Fuente: Hidrología e hidráulica aplicadas-aguas subterráneas –IMFIA 2008

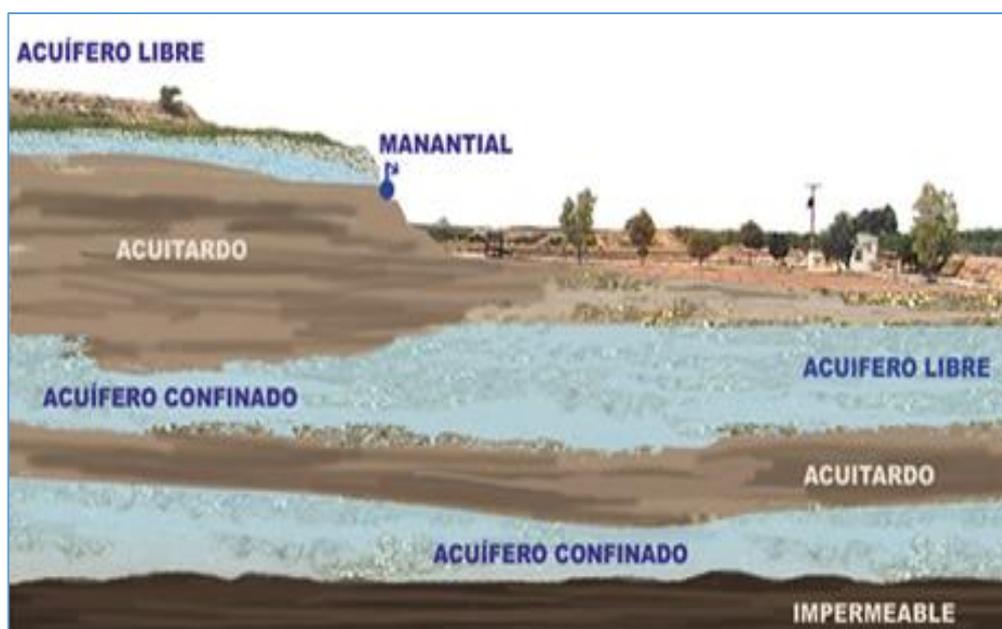
- c. **Acuíferos semiconfinados.** Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua.

**Tabla N° 05:** Formaciones geológicas frente al agua.

	CAPACIDAD DE ALMACENAR AGUA	CAPACIDAD DE DRENAR AGUA	CAPACIDAD DE TRANSMITIR AGUA	FORMACIONES CARACTERÍSTICAS
<b>ACUÍFEROS</b>	Alta	Alta	Alta	Gravas, Arena, Caliza
<b>ACUITARDOS</b>	Alta	Media/baja	Baja	Limo, Arena, Arcilla
<b>ACUICLUDO</b>	Alta	Muy baja	Nula	Arcillas
<b>ACUIFUGO</b>	Nula	Nula	Nula	Granito, Mármol, Gneis

Fuente. Luis Gonzales de Vallejo, Ingeniería Geológica, Madrid, 2002.

**Figura N° 05.** Tipos de Acuíferos



**Fuente:** [www.marm.es/sia/visualizacion/lda/fisico/hidrogeologia\\_acuiferos.jsp](http://www.marm.es/sia/visualizacion/lda/fisico/hidrogeologia_acuiferos.jsp)

#### **2.1.4. PARAMETROS HIDROGEOLÓGICOS**

La caracterización de las propiedades hidráulicas del medio poroso está definida por las llamadas "constantes hidrogeológicas".

Desde el punto de vista del drenaje las constantes de mayor importancia; son la conductividad hidráulica y el espacio poroso drenable;

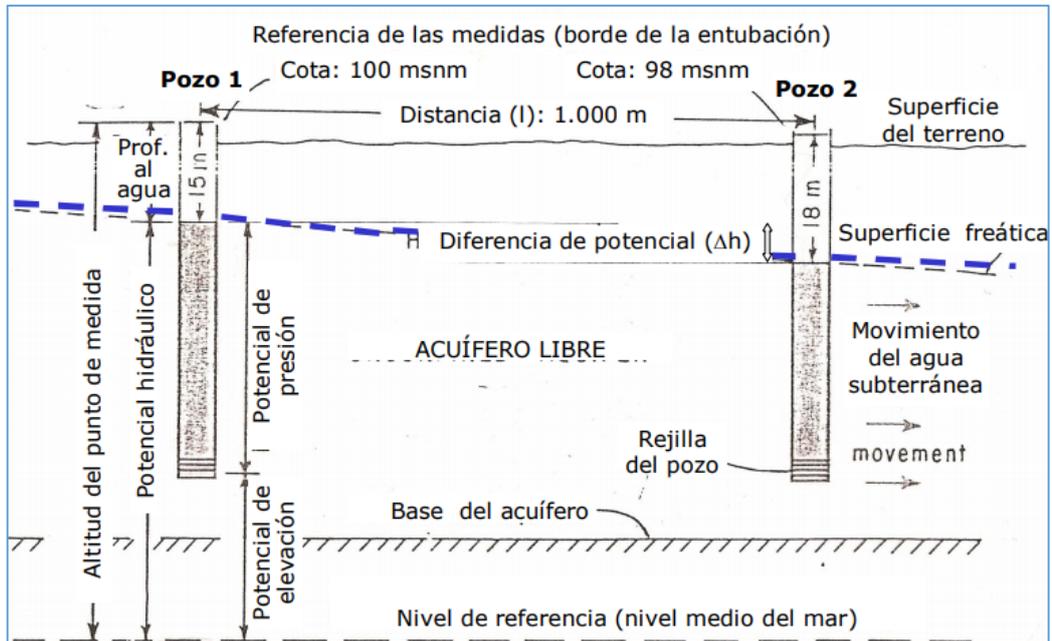
##### **2.1.4.1. GRADIENTE HIDRÁULICO (i).**

El agua subterránea se mueve en la dirección en que decrece el potencial hidráulico total, de manera que si se mantienen constantes todos los demás factores, la cuantía del movimiento de aquella en el seno de la zona saturada depende del gradiente hidráulico.

El gradiente hidráulico se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida

o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua.<sup>7</sup>

**Figura N° 06. Gradiente hidráulico**



**Fuente:** <https://es.slideshare.net/mecanica-de-suelos-propiedades-hidraulicas>.

$i = \frac{h_1 - h_2}{L} = \frac{\Delta h}{L}$  El gradiente hidráulico se define como el cociente entre la diferencia de carga entre dos puntos y la distancia medida a lo largo de la línea de corriente del flujo entre esos dos puntos es adimensional, es decir:

No confundir el gradiente hidráulico:  $i = \frac{h_1 - h_2}{L}$  con el valor de la pendiente:  
Aplicando el concepto del gradiente hidráulico, las ecuaciones de la Ley de Darcy, se pueden expresar como:

$$v = KiQ = Kai$$

<sup>7</sup> Luis F. Rebollo, hidrogeología – Departamento de Geología – UAH – Universidad de Alcalá - 1987

#### 2.1.4.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K).

Se define como el caudal de agua que pasa a través de una superficie unitaria de acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario.

La conductividad hidráulica es dependiente del fluido (la variación de K depende de las viscosidad, densidad y presencia de sales en el fluido) y del medio poroso en conjunto, diferenciándose del término permeabilidad, que se define única y exclusivamente en función del medio poroso. Puede expresarse como:

$$K = k_0 \frac{\gamma}{\mu}$$

**Donde:**

K: Conductividad hidráulica (LT-1)

$\gamma$ : Peso específico del agua (ML-2T-2)

$\mu$ : Viscosidad del agua (MT-1L-1)

$k_0$ : Permeabilidad Intrínseca que vale Cd<sup>2</sup> (L<sup>2</sup>)

C: Constante que incluye las características de la roca (Grado y tipo de estratificación, compactación y grado de cementación).

d: Es el tamaño medio de los poros equivalentes al diámetro de la curva granulométrica que representa el paso del peso del 50% de la muestra (L).

$k_0$  Engloba las características del medio acuífero por el que circula el agua y y/u las de la roca.

Es la constante que define la capacidad del medio poroso para transmitir al agua a través de sí mismo.

La conductividad hidráulica de los suelos, se define como la velocidad de infiltración que se presenta en un, medio saturado, cuando la gradiente hidráulica es igual a la unidad

En la ecuación:

$$v=Ki \quad \text{si } i = 1$$

Entonces  $v = K$

De allí que sus unidades sean las de velocidad (pero no debe confundirse con ella) y generalmente se mide en m/día o cm/hora.

### **2.1.4.3. POTENCIAL HIDRÁULICO.**

Tanto el nivel piezométrico como el nivel freático, es decir la altura que alcanza el agua subterránea en el interior de un sondeo ranurado, exclusivamente en un punto de un acuífero, son consecuencia directa de la energía que tiene el agua en ese punto. A esta energía se le denomina potencial hidráulico en ese punto.

El potencial hidráulico es la suma de la energía potencial consecuencia de la posición del punto en el espacio y una energía consecuencia de la presión a la que se encuentra el agua en el punto que se considere.

En un sistema estático el potencial hidráulico tiene el mismo valor en todos sus puntos, de no ser así el agua se movería de las zonas de mayor energía a las de menor energía.

En un sistema dinámico hay que tener en cuenta la energía cinética consecuencia de la velocidad del movimiento. Al ser en la generalidad de los casos, la velocidad del flujo subterráneo muy lenta, este término suele ser despreciable.

Cuando un acuífero en condiciones ideales de rigidez aflora en una zona que constituye el área de recarga y en otra el área de descarga, estando confiando en el área intermedia por materiales que se han depositado posteriormente sobre él, el nivel piezométrico en la zona de confinamiento

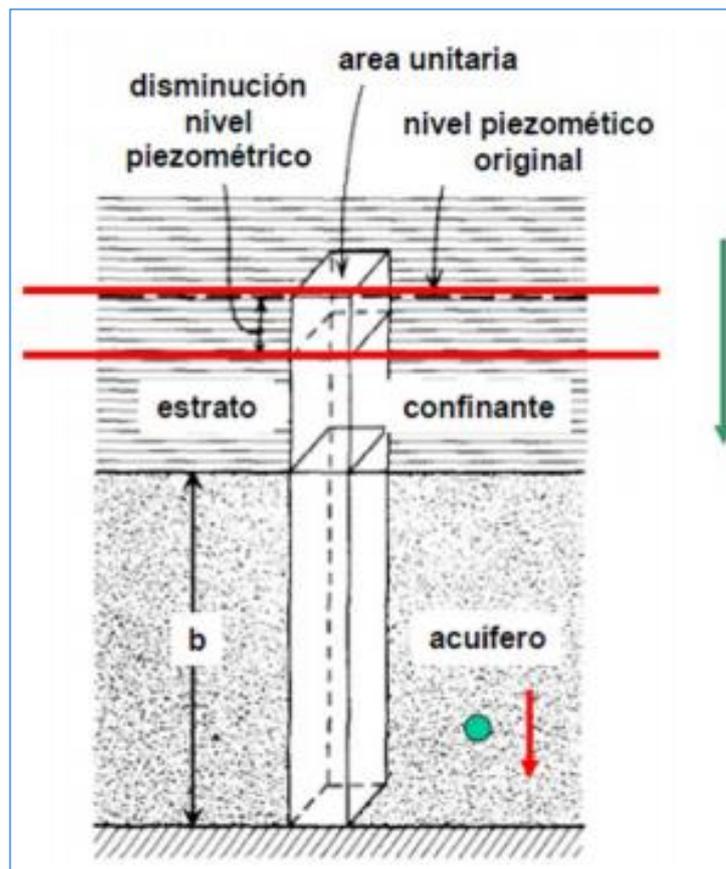
vienen condicionado por el potencial hidráulico en las áreas de recarga y descarga.

#### 2.1.4.4. COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO (S)<sup>8</sup>

Es adimensional. Se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión)

Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura la del espesor saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico.

**Figura N° 07.** Coeficiente de Almacenamiento



Fuente: [www.fcfm.cl](http://www.fcfm.cl)

<sup>8</sup> Juan J. Ordoñez Gálvez, Aguas Subterráneas-Acuíferos SENAMHI, 1era Edición, Lima – Perú, 2011

En acuíferos confinados los valores típicos se encuentran entre 0.00005 y 0.005, mucho menores que la porosidad eficaz de un acuífero libre (ver abajo). Esto se debe a que en un acuífero confinado el agua no es liberada por el drenaje de los intersticios sino por la compresión del acuífero, en particular de las capas de arcillas y limos intercaladas, (por eso también denominado coeficiente de almacenamiento elástico), y todo el material acuífero permanece saturado.

En un acuífero libre:  $S = 0'05 - 0'03$

En acuíferos confinados:  $S = 10^{-3} - 10^{-5}$

**a. Coeficiente de Almacenamiento en los Acuíferos Libres:**

El volumen de agua que puede obtenerse de acuerdo al agua almacenada en los poros interconectados del medio y que puede ser drenada por gravedad.

**b. Coeficiente de Almacenamiento en Acuíferos Semiconfinados y Confinados:**

El volumen de agua que puede liberarse según la definición de este parámetro, está en relación con los fenómenos elásticos que se producen en el sistema como consecuencia de la variación de la presión intersticial al disminuir el potencial hidráulico. Este hecho no supone el vaciado físico del acuífero. Si el nivel piezométrico alcanzara el techo del acuífero este pasaría a ser libre.

El orden del coeficiente de almacenamiento está condicionado por los valores de los coeficientes de compresibilidad del agua y del acuífero. En la generalidad de los casos suele estar entre  $10^{-3}$  y  $10^{-5}$ . Se expresa:  $S = \gamma \times b \times m_e \beta + \gamma \times b \times \alpha$

$$S = \gamma \times b \times m_e \beta + \gamma \times b \times \alpha$$

**Donde:**

S: Coeficiente de almacenamiento

y: Peso específico del agua (ML-2T-2)

b: Espesor saturado del acuífero (L)

me: Porosidad eficaz.

$\beta$ : Modulo de compresibilidad del agua (L2M-1)

$\alpha$ : Modulo de compresibilidad del acuífero (L2M-1T2)

$$S = y \cdot b \cdot m_e \cdot \beta + y \cdot b \cdot \alpha$$

Donde en primer sumando indica, de acuerdo con las condiciones de la definición de coeficiente de almacenamiento, el volumen liberado como consecuencia de la compresibilidad del agua y el segundo como consecuencia de la del acuífero.

#### 2.1.4.5. TRANSMISIVIDAD (T)<sup>9</sup>

Es una medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua o transmitir agua, definiéndose como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, a través de una franja vertical de acuífero de ancho unitario, extendida en todo el espesor saturado, cuando el gradiente hidráulico es unitario y a una temperatura de 15°C (Arocha 1980).

$$T = KD$$

**Donde:**

**Z=** Transmisibilidad (m<sup>2</sup>/día o cm<sup>2</sup>/hora)

**K =** Conductividad hidráulica (m/día o cm/hora)

**D =** Espesor del acuífero (m o cm)

---

<sup>9</sup> Juan J. Ordoñez Gálvez, Aguas Subterráneas-Acuíferos SENAMHI, 1era Edición, Lima – Perú, 2011

Si la formación acuífera es de naturaleza estratificada, en donde los valores de la conductividad hidráulica no son constantes a lo largo del eje vertical y muestran variación, la transmisibilidad T es expresada Por:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i$$

La transmisividad de un acuífero es un concepto que asume que flujo a través de él es horizontal. En algunos casos este supuesto es válido, pero en otros no. También nos indica la posibilidad que ofrece un acuífero de cara a su explotación.

#### 2.1.4.6. POROSIDAD (H)<sup>10</sup>

La porosidad de un terreno se define como la relación del volumen de huecos (vacíos) al volumen total del terreno que los contiene, es decir:

$$\eta = 100 \frac{w}{v}$$

**Donde:**

$\eta$  = porosidad en %

w = volumen de agua requerida para llevar a saturar todos los huecos

v = volumen total de la roca o suelo

La porosidad depende de un gran número de factores tales como la naturaleza fisicoquímica del terreno granulometría de sus componentes, grado de cementación, o compactación de los mismos, efectos de disolución, de meteorización' fisuración etc.

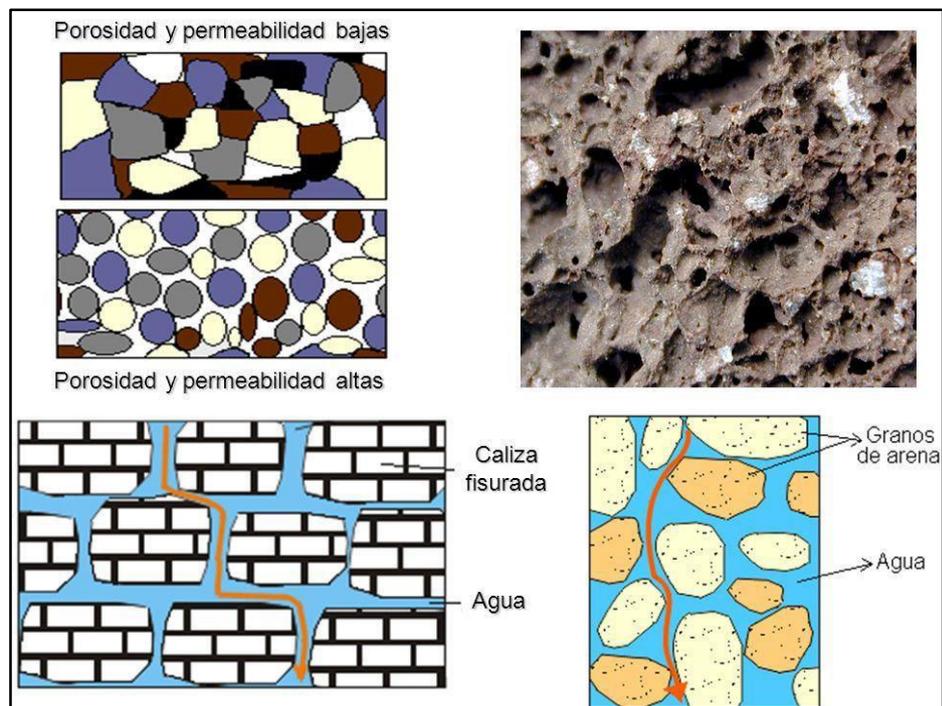
---

<sup>10</sup> Máximo Villon, Hidrología, 2da Edición, Lima –2002.

La porosidad de un terreno puede variar, entre márgenes muy pequeños amplios de 80% 90% en sustancias floculentas como las de los depósitos recientes en los deltas, hasta menos de 1% en las rocas compactas.

En los depósitos de materiales sueltos, los cuales constituyen las fuentes más importante de aguas subterráneas, las porosidades pueden oscilar de un 5% a un 40%. La porosidad se considera media y grande si se eleva por encima de 20%.

**Figura N° 08.** Porosidad y permeabilidad



**Fuente:** Fuente. Máximo Villon, Hidrología, 2da Edición, Lima – 2002.

**a. Porosidad Eficaz:**

Viene a ser el volumen de poros interconectados con relación al volumen de la roca, expresado en porcentaje.

**b. Tipos de porosidad:**

- **Porosidad Intergranular.** Típico de rocas detríticas no consolidadas, en ellas los poros constituyen una intrincada red de canales de pequeño diámetro por los que circula el agua subterránea.

Para clastos esféricos de igual tamaño y con empaquetamiento cúbico la porosidad es máxima, un 47.65%. Para el mismo tipo de clastos, si el empaquetamiento es romboédrico la porosidad disminuye hasta el 25.95%.

*Ejemplos:*

- Depósitos fluviales.
  - Las fosas tectónicas rellenas de materiales no consolidados.
  - Los depósitos eólicos.
  - Los depósitos glaciares.
- **Porosidad por fisuración:** Las fisuras no suelen estar distribuidas homogéneamente en todo el volumen de la roca en donde generalmente se encuentran zonas fisuradas junto a zonas en donde la ausencia de fisuras es total. Cuando la densidad de la red de fracturas es muy elevada y homogénea en todo el volumen de la roca el comportamiento hidrogeológico puede asimilarse semejante al de las rocas con porosidad intergranular.

La porosidad de este tipo de rocas suele ser menor al 5%.

En las rocas volcánicas la porosidad es variable: ejemplo los basaltos oscila entre 1% - 12%, mientras que en la pumita puede alcanzar el 87%.

- **Porosidad por disolución:** Es la porosidad de los medios kársticos en los que a partir de pequeñas fisuras y planos de estratificación el agua va disolviendo la roca y acaban por formarse verdaderas redes de drenaje tridimensional por los que pueden circular auténticos ríos de agua subterránea.

## 2.1.5. MOVIMIENTO DEL AGUA ATRAVES DEL SUELO

### 2.1.5.1. ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO EN RÉGIMEN TRANSITORIO Y PERMANENTE.

Aplicando el principio de conservación de masas (entradas de masa de agua menos salidas igual a la variación de masa en el almacenamiento del elemento).

$$\Delta V_x = k \frac{\partial \vec{v}_x}{\partial x}$$

**Donde:**

$\partial \vec{v}_x$ : Diferencial de la velocidad respecto al eje x.

$\partial x$ : Variación de la posición respecto al eje x.

$\Delta V_x$ : Variación del volumen de agua almacenado respecto al eje x.

$k$ : Conductividad Hidráulica.

Al mismo tiempo teniendo en cuenta la ley de Darcy:

$$\vec{v}_x = k \frac{\partial h}{\partial x}$$

Para un medio homogéneo e isótropo quedara:

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

Esta ecuación representa un balance de flujos de flujos de agua en la unidad de tiempo en el elemento unitario del acuífero que hemos considerado.

El término de la izquierda representa las entradas menos las salidas de agua de agua y el término de la derecha la variación del volumen almacenado, que puede expresarse:

$$\Delta V = S^* \frac{\partial h}{\partial t}$$

Siendo  $S^*$  el coeficiente de almacenamiento específico por tratarse de un elemento del acuífero de espesor igual a la unidad. Al ser el área de la base del elemento de acuífero también la unidad, el producto expresa el volumen de agua que pierde o gana el elemento del acuífero de espesor igual a la unidad.

### 2.1.5.2. LEY DE DARCY

La ley de Darcy permite definir un vector velocidad que es la resultante de todos los vectores velocidad que podrían definirse para cada uno de los poros en la zona considerada.

Llamáremos líneas de corriente a la línea de constante mente al vector velocidad definido en un medio poroso a partir de la ley de Darcy. Matemáticamente sería la envolvente del vector velocidad. Una trayectoria sería más o menos tortuosa. Q continuara un lugar geométrico de las sucesivas posiciones de una partícula de agua en su movimiento a través de un medio poroso.

Darcy llegó a la conclusión de que la cantidad de agua que fluye a través de un medio poroso (muestra de arena) por unidad de tiempo, en otras palabras el caudal o la descarga, es proporcional a la sección transversal  $A$ , a la diferencia entre cargas del fluido  $\Delta\phi$  en las superficies de entrada y de salida de la muestra, es decir la pérdida de carga  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ , e inversamente proporcional a la longitud de la muestra de arena o trayectoria del flujo.

Esta proporcionalidad es expresada matemáticamente como sigue:

$$Q = KA \frac{\phi_1 - \phi_2}{L} \quad \text{o} \quad Q = KA \frac{\Delta\phi}{L}$$

**Donde:**

Q = volumen de agua que atraviesa la muestra por unidad de tiempo

A = área de la sección transversal

L = longitud de la muestra

$\phi_1$  y  $\phi_2$  = potenciales en los puntos 1 y 2 respectivamente

$\Delta\phi$  = pérdida de carga

K = constante de proporcionalidad llamada conductividad hidráulica que depende de la naturaleza de la arena y del fluido (agua).

La cantidad:  $q \frac{Q}{A}$ , representa la descarga o cantidad de flujo por unidad de sección transversal o "flux específico" o descarga específica.

De la ecuación de continuidad:  $v = \frac{Q}{A}$  se llama velocidad aparente, entonces se tiene:

$$Q = KA \frac{\phi_1 - \phi_2}{L} \rightarrow v \frac{Q}{A} = K \frac{\phi_1 - \phi_2}{L}$$

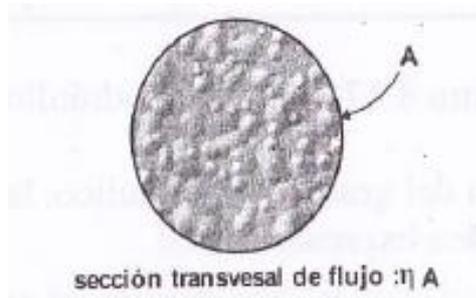
$$v = K \frac{\phi_1 - \phi_2}{L}$$

Debe llenarse en cuenta que la velocidad del flujo, en cada uno de los poros del suelo, excede a la velocidad aparente, que en realidad es la velocidad hipotética que tendría el agua al fluir a través de la columna de flujo dada, poco obstruida por las partículas sólidas.

La velocidad real de las partículas del agua  $v_t$  se deduce de la siguiente expresión:

$$v_t = \frac{Q}{\eta A} = \frac{v}{\eta}$$

Donde  $\eta$  es la porosidad del suelo.



Como  $\eta$  es siempre menor que 1, fácilmente puede verse que la velocidad real del agua es siempre mayor que la velocidad aparente.

### 2.1.5.3. SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

También llamadas líneas equipotenciales, son el lugar geométrico de los puntos que tienen el mismo potencial hidráulico. Se trataría de superficies o líneas en las que el agua subterránea tiene la misma energía en todos los puntos.

El gradiente hidráulico indica la dirección en la que se produce el máximo cambio de energía entre dos equipotenciales. Por lo tanto es perpendicular a las equipotenciales, además el vector gradiente y el vector velocidad son paralelos entre sí. Puede concluirse que líneas de corriente y equipotenciales son perpendiculares entre sí.

En un acuífero isótropo y homogéneo, línea de corriente y equipotenciales constituyen una malla ortogonal que se denomina red de flujo. La red de flujo define el movimiento de las aguas subterráneas puesto que las líneas de corriente van en la dirección perpendicular a las equipotenciales y en sentido de los potenciales decrecientes.

Se denomina tubo de flujo a la porción de acuífero limitada por una serie de líneas de corriente que pasan por un contorno cerrado. La propiedad de los tubos de flujo es que el caudal que circula por ellos se conserva

constante. Aplicando la ley de Darcy se puede calcular el caudal circulante en la sección intermedia definida entre los dos equipotenciales.

$$Q = a \cdot b \cdot K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

**Donde:**

Q = Caudal circulante por el tubo de flujo.

a = Ancho del tubo de flujo.

b = Espesor del tubo de flujo.

K = Conductividad hidráulica del medio.

$\Delta h$  = Diferencia de potencial hidráulico.

$\Delta l$  = Distancia entre las dos equipotenciales.

Este caudal será el mismo en cualquier sección del tubo de flujo perpendicular a las líneas de corriente. Si aumenta la sección disminuye la velocidad de flujo y viceversa, pero el caudal siempre es constante.

Por lo tanto en una red de flujo cuadrada y de espesor unitario, el caudal circulante es independiente del tamaño de la malla, y que por todos los tubos de flujo de la red circula el mismo caudal.

### **2.1.6. PIEZÓMETROS <sup>11</sup>**

Los piezómetros pueden ser múltiples en una sola perforación, porque pueden ser ejecutados con variados propósitos, por ejemplo: se observa dos o más acuíferos, se muestrea independientemente cada uno de los acuíferos para su caracterización - su comportamiento en el tiempo puede resultar diferente - se emplazan en diferente tipo de alteración hidrotermal, reportan información de dos tipos diferentes de cronología hidrogeológica.

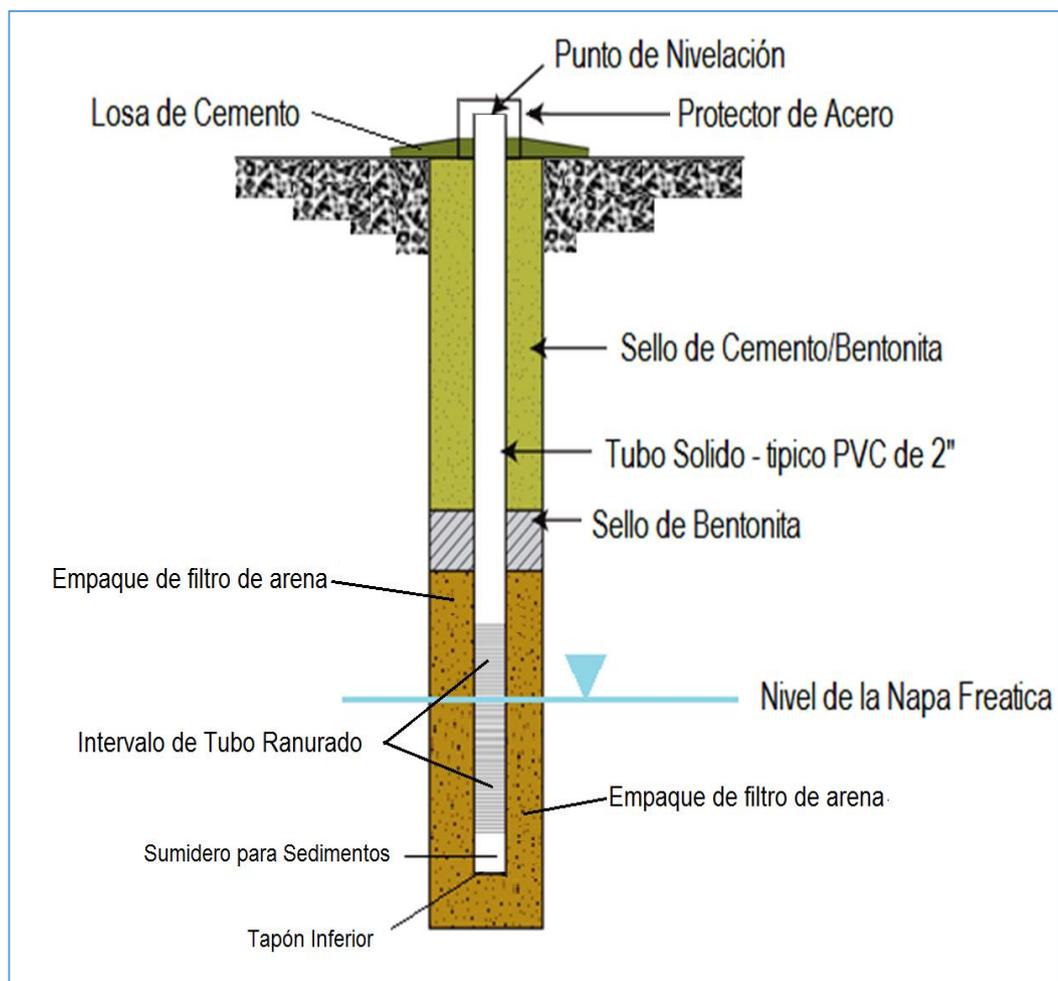
---

<sup>11</sup> Minera Barrick Misquichilca S.A., PERFORACION, INSTALACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y PROTECCIÓN DE PIEZÓMETROS DE TUBO ABIERTO, 2013.

### Funciones:

- Medir el nivel freático y/o piezométrico, del agua
- Conocer las Características hidrodinámicas del acuífero
- Muestreo Hidrogeoquímico del agua
- Toma de muestras de calidad de agua
- Clasificación del agua.

**Figura N° 09.** Elementos de un piezómetro tubo abierto



**Fuente:** Minera Barrick Misquichilca S.A., Perforación, Instalación, Construcción Y Protección de Piezómetros de Tubo Abierto, 2013.

### **2.1.6.1. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DEL PIEZÓMETRO DE TUBO ABIERTO<sup>12</sup>**

#### **a. Diseño del Piezómetro.**

Diseño se refiere a las decisiones en cuanto a si el piezómetro se construirá como un solo tubo abierto (tipo Casagrande), una doble terminación con dos o más tipos Casagrande, la instalación de sensores de cuerda vibrante (VW) ó una combinación de tubo abierto y piezómetros de sensor VW.

Diseño luego debe determinar a qué profundidad se colocarán los intervalos ranurados y sólidos, la profundidad ó la elevación de la parte superior del filtro de arena, la profundidad ó la elevación de la parte superior del sello de bentonita, y finalmente, el método y materiales para llenar el espacio anular desde la parte superior del sello de bentonita hasta la superficie.

El diseño es función del propósito del piezómetro.

Básicamente hay dos propósitos 1) Muestreo de la calidad de agua, 2) medir el nivel piezométrico.

1. Tomar muestras de la calidad de agua tiene que definir si queremos muestras puntuales o promedios:
  - Monitoreo aguas poco profundos
  - Monitoreo de aguas poco profundos
  
2. Medición del nivel piezométrico:
  - Medir la napa freática (agua poco profundo)
  - Medir la Presión de Poros de la roca profunda

---

<sup>12</sup> Minera Barrick Misquichilca S.A., PERFORACION, INSTALACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y PROTECCIÓN DE PIEZÓMETROS DE TUBO ABIERTO, 2013.

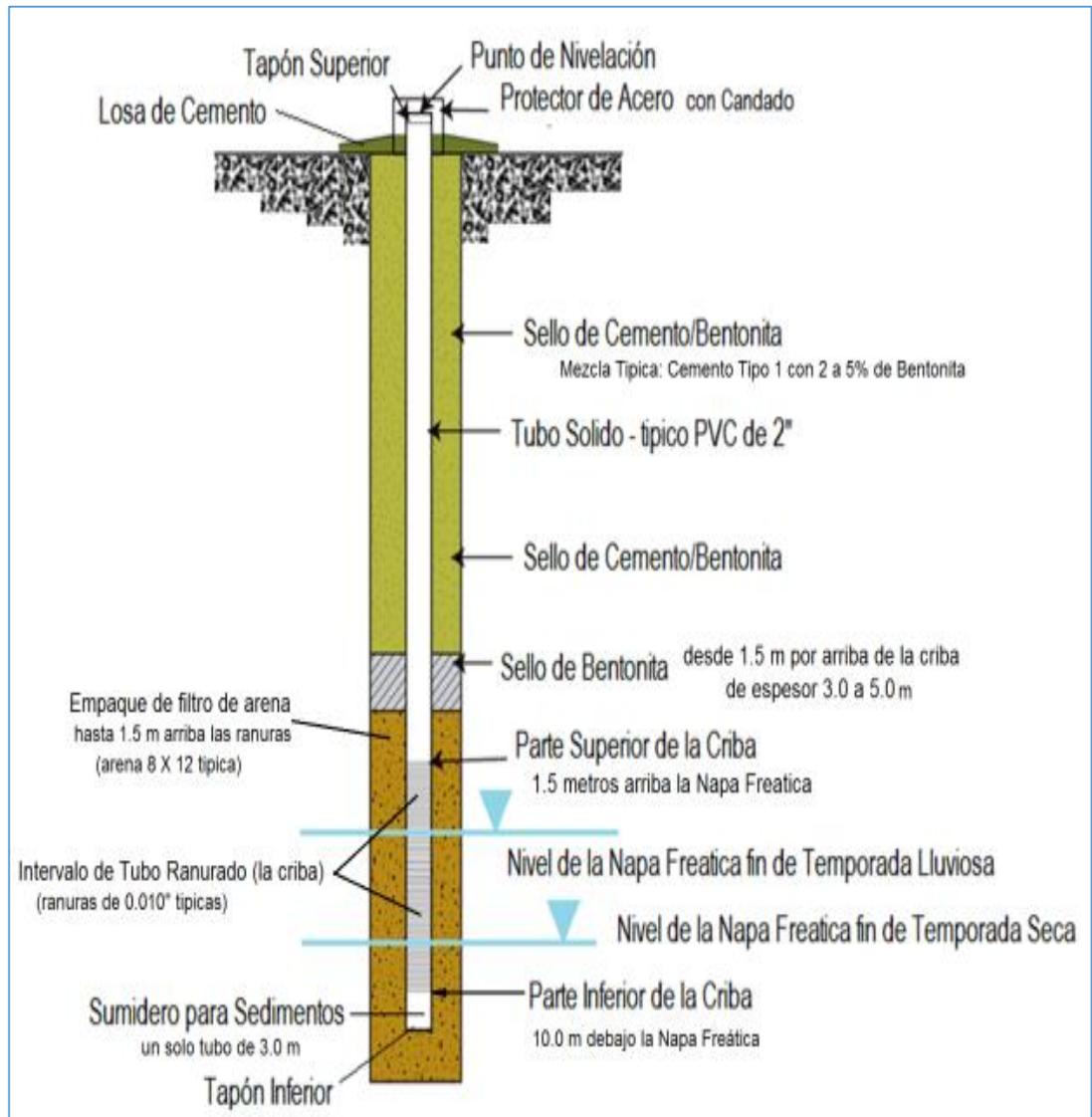
En ambos casos (muestreo o medición) tenemos que definir si queremos muestras puntuales o promedios porque este determinará la longitud del intervalo ranurado. Es decir, si queremos una muestra representativa de un solo punto, necesitamos instalar un intervalo corte (3.0 metros) pero si queremos una muestra representativa del promedio de un acuífero, necesitamos instalar un intervalo ranurado más largo.

**a.** El diseño también debe tomar en consideración:

- Primer encuentro de agua subterránea
- El logueo geológico (registro litológico y de alteraciones hidrotermales)
- Las fallas geológicas o zonas de fractura observadas durante la perforación
- Resultados de las pruebas AirLift tomados durante la perforación
- Zonas de pérdida o ganancia de agua como se indicó durante la perforación

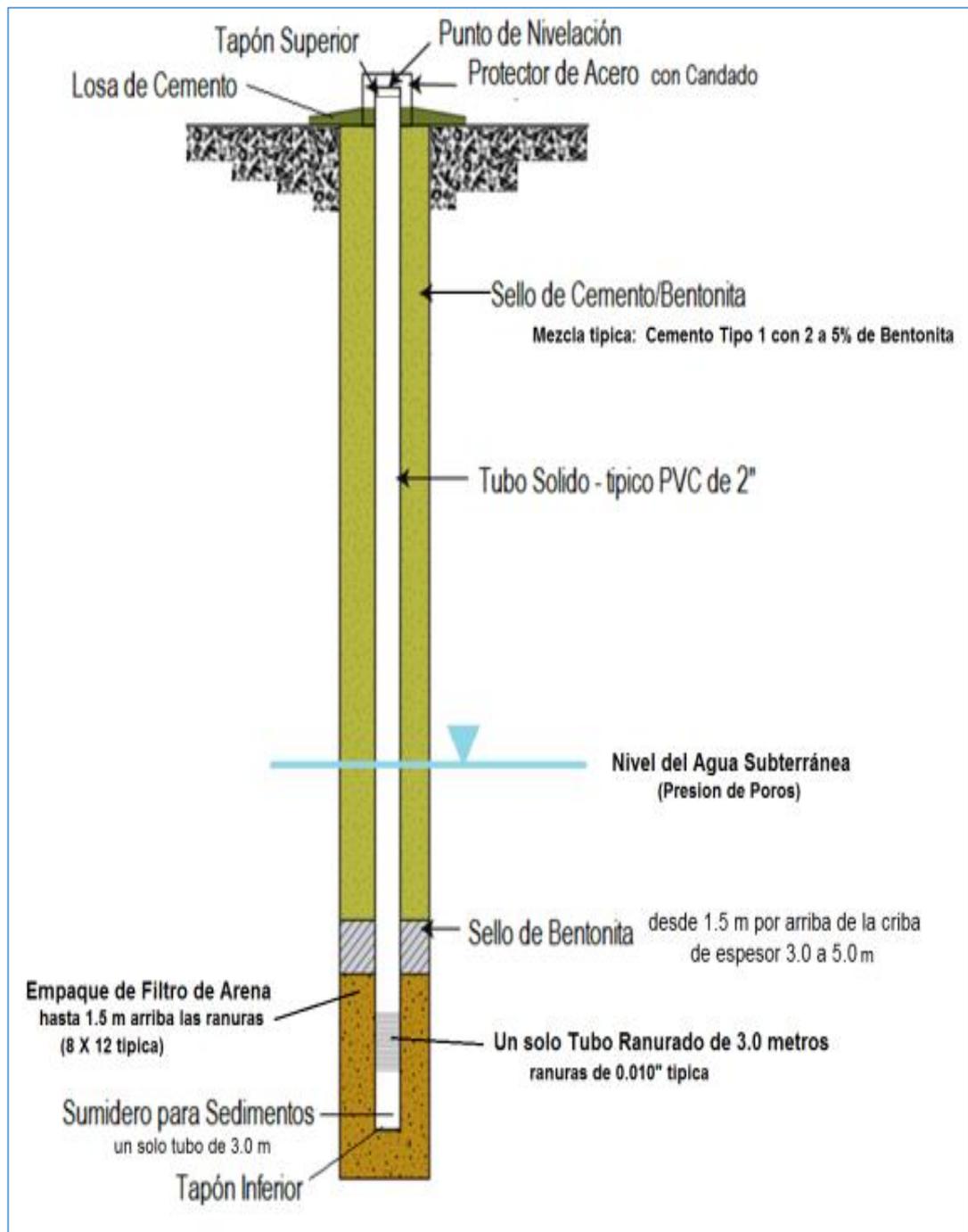
El diseño debe tomar en cuenta que queremos minimizar el volumen de agua que debe ser evacuado durante el proceso de muestreo. Si el propósito del piezómetro es tomar muestras del agua poco profundo, el piezómetro debería ser terminado no más profundo que 10.0 metros debajo la napa freática. Típicamente el volumen mínimo evacuar antes de tomar una muestra es tres veces el volumen estático. Es decir, no vale tener un piezómetro de 150 m de profundidad si la napa freática esta solamente 50 metros debajo el superficie.

**Figura N° 10.** Diseño ideal para piezómetro tipo Tubo Abierto (Casagrande) para medir la Napa Freática y tomar muestras del agua poco profunda.



**Fuente:** Minera Barrick Misquichilca S.A., Perforación, Instalación, Construcción Y Protección de Piezómetros de Tubo Abierto, 2013.

**Figura 11:** Diseño ideal para piezómetro tipo Tubo Abierto para medir la Presión de Poros del Agua Profunda y tomar muestras del Agua Subterránea de un intervalo corto (muestra puntual).



**Fuente:** Minera Barrick Misquichilca S.A., Perforación, Instalación, Construcción Y Protección de Piezómetros de Tubo Abierto, 2013.

### **2.1.7. SISTEMAS DE PERFORACIÓN<sup>13</sup>**

Los sistemas de penetración de la roca que han sido desarrollados y clasificados por orden de aplicación son:

#### **a. Mecánico- Percusión**

- Rotación
- Roto Percusión

#### **b. Térmicos :**

- Soplete o lanza térmica
- Plasma
- Fluido caliente
- Congelación

#### **c. Hidráulicos:**

- Chorro de agua
- Erosión
- Cavitación

#### **d. Sónicos**

- Vibraciones de alta frecuencia

#### **e. Químicos:**

- Micro volumen
- Disolución

#### **f. Eléctricos:**

- Arco eléctrico
- Inducción magnética

---

<sup>13</sup> Carlos y Emilio López Jimeno, "Manual de Perforación y Voladura de Rocas", Madrid, 2003

#### **g. Sísmicos**

- Rayos láser

#### **h. Nucleares:**

- Fusión
- Fisión

### **2.1.8. PERFORACIÓN DE POZOS DE AGUA.**

La perforación del pozo es la primera operación que se realiza y tiene como finalidad abrir un taladro, con la distribución y geometría adecuada dentro de los macizos rocosos, donde se alojan la acumulación de minerales y fluidos dentro de la corteza terrestre, y finalmente instalar piezómetros y pozos de producción de agua para su aprovechamiento.

#### **2.1.8.1. SONDEOS.**

En la actualidad a las perforaciones tanto como para investigación como para producción se le denomina sondeos dentro de los cuales están las perforaciones de grandes longitudes es decir perforaciones para la instalación de pozos de producción de petróleo, pozos de agua y piezómetros.

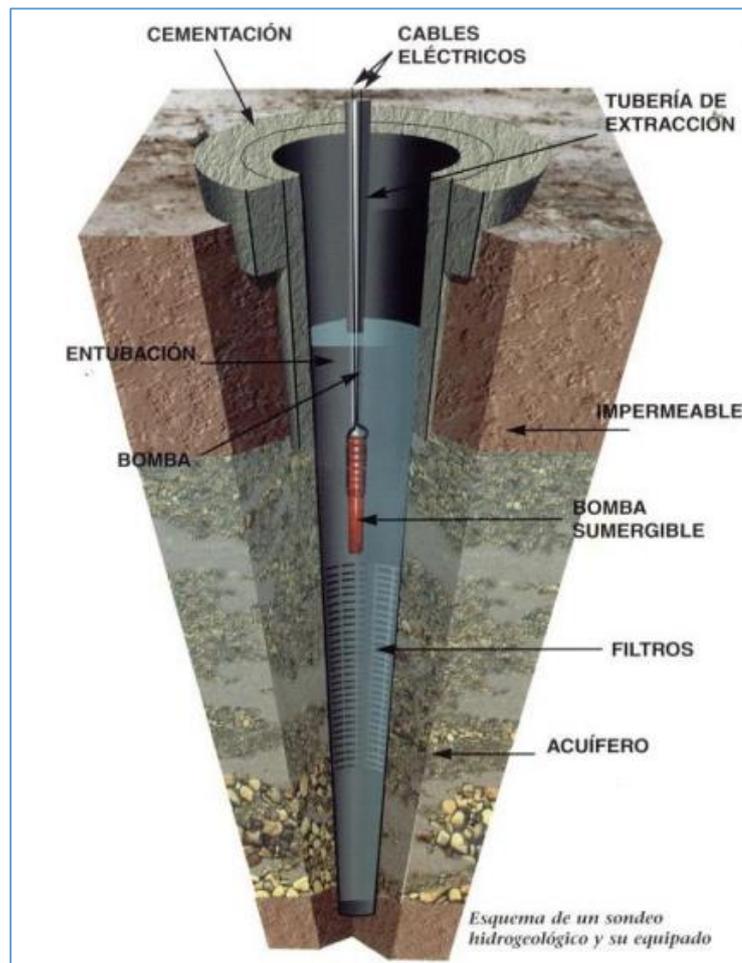
El desarrollo del sondeo tiene por finalidad eliminar los elementos finos que quedan dentro de la perforación (después de realizar la entubación y el empaque de gravas), a la vez que se consigue la ordenación por tamaño de las gravas, quedando las más gruesas junto a los orificios del filtro.<sup>14</sup>

A continuación se describe a los diferentes tipos de sondeos según su objetivo (investigación, explotación y otros), sus características geométricas y su metodología de perforación.

---

<sup>14</sup> Carlos y Emilio López Jimeno, "Manual de Perforación y Voladura de Rocas", Madrid, 2003

**Figura 12:** Esquema de un sondeo hidrológico y su equipado



Fuente: Hidrología e Hidráulica Aplicadas (López-Geta et al, 2001)

**a. Clasificación de los sondeos según su aplicación**

- **Sondeos de Investigación.**
  - Sondeos cartográficos,
  - Sondeos de prospección y de evaluación geológico- minera,
  - Sondeos hidrogeológicos, piezometricos,
  - Sondeos geotécnicos y sondeos sísmicos.
  
- **Sondeos de Explotación.**
  - Sondeos de captación de aguas,

- Sondeos de petróleo y gas,
- Sondeos de disolución y lixiviación,
- Sondeos para la gasificación subterránea,
- Sondeos de inyección.

**b. Clasificación de los Sondeos según sus características geométricas.**

- **Longitud:** Los sondeos se denominan: superficiales (hasta 200m), poco profundos (de 200 m. a 1.200m), profundos (de 1.200 a 4.000 m) y muy profundos (de más de 4.000 m).
- **Diámetro:** El diámetro de los sondajes varía de acuerdo al tipo del sondaje a realizar. Para la construcción de pozos de agua el diámetro óptimo considerado se encuentra en el rango de 12 - 15 pulgadas.
- **Rumbo e Inclinación:** El tercer parámetro geométrico, es la inclinación. Generalmente los sondeos superficiales son verticales, aunque en muchos casos son inclinados, bien desde su inicio o a una determinada profundidad.

**2.1.9. PROPIEDADES FÍSICAS DEL MACIZO ROCOSO**

Las principales propiedades físicas del macizo rocoso que influyen en los mecanismos de penetración y consecuentemente en la elección del método de perforación son:

**2.1.7.1. DUREZA:**

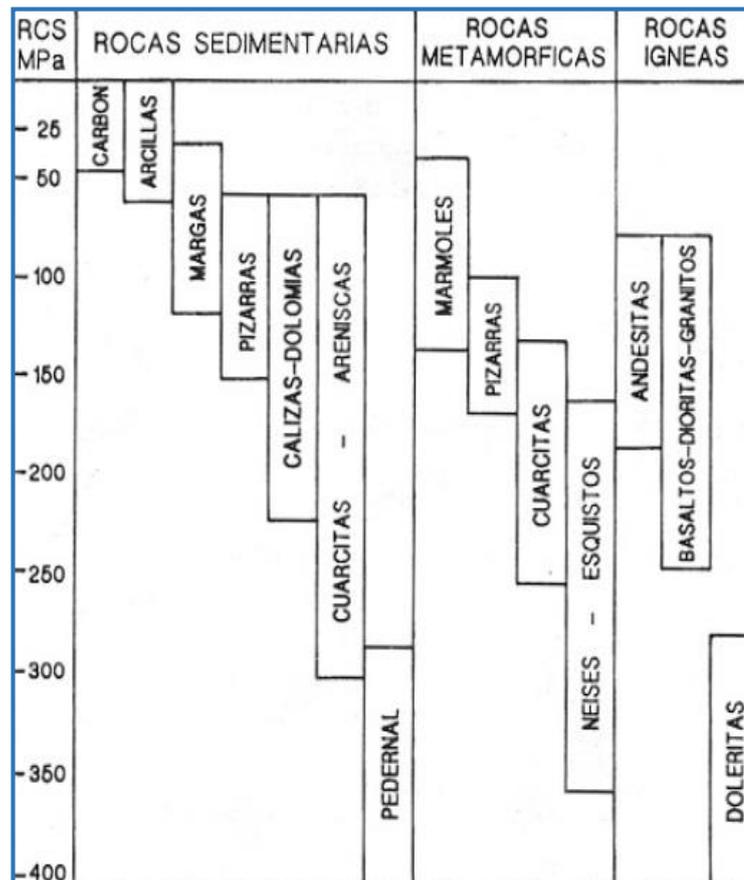
Según López Jimeno, comenta: “Se entiende por dureza la resistencia de una capa superficial a la penetración en ella de otro cuerpo más duro”.

La dureza es una condición de la superficie del material, no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. Si bien, es un término que nos da idea de solidez o firmeza, no existe una definición única acerca la dureza y se la suele definir arbitrariamente en relación al método particular que se utiliza para la determinación de su valor.

### 2.1.7.2. RESISTENCIA:

Según López Jimeno, comenta: “Se llama resistencia mecánica de una roca a la propiedad de oponerse a su destrucción bajo una carga exterior, estática o dinámica”.

**Figura N° 13:** Intervalos frecuentes de resistencia



**Fuente.** Dr. Rolando Carrascal, Cartografía Hidrogeológica, Escuela Geológica FIGMM - UNI, Lima - Perú, 2008.

La resistencia de un macizo rocoso será función de la resistencia de la roca intacta, la resistencia de las discontinuidades y de cómo éstas se distribuyan en el macizo. Cuando la geometría de las discontinuidades controla la estabilidad del macizo, lo más correcto es considerar la resistencia de las estructuras.<sup>15</sup>

Entre las rocas sedimentarias las más resistentes son las que tienen cemento silíceo. En presencia de cemento arcilloso la resistencia de las rocas disminuye de manera brusca. La porosidad en rocas con una misma litología conforme aumenta hace disminuir la resistencia, puesto que simultáneamente disminuye el número de contactos de las partículas minerales y las fuerzas de acción recíprocas entre ellas. En la resistencia de las rocas influye la profundidad a la que se formaron y el grado de metamorfismo.

Por otro lado, la resistencia de las rocas anisotrópicas depende del sentido de acción de la fuerza. La resistencia a compresión de las rocas en el sentido perpendicular a la estratificación o esquistosidad es mayor que en un sentido paralelo a éstas. El cociente que suele obtenerse entre ambos valores de resistencia varía entre 0,3 y 0,8; y sólo para rocas isotrópicas es igual a 1.

### **2.1.7.3. ELASTICIDAD:**

*Según López Jimeno, comenta:* “La mayoría de los minerales constituyentes de las rocas tienen un comportamiento elástico-frágil, que obedece a la Ley de Hooke, y se destruyen cuando las tensiones superan el límite de elasticidad”.

La elasticidad es una propiedad de un material ideal y podemos vincularla con los materiales que se utilizan en ingeniería, incluyendo a las rocas en

---

<sup>15</sup> Dr. Rolando Carrascal, Cartografía Hidrogeológica, Escuela Geológica FIGMM - UNI, Lima – Perú, 2008.

mayor o menor grado y en función de cuanto estos materiales se acercan al ideal. Prácticamente esto depende de tres factores principales: homogeneidad, isotropía y continuidad, cada uno de los cuales pueden ser definidos dentro de ciertos límites.

Según el carácter de deformación, en función de las tensiones provocadas para cargas estáticas, se consideran tres grupos de rocas.

- Las elasto-frágiles o que obedecen a la Ley de Hooke,
- Las plástico-frágiles, a cuya destrucción precede la deformación plástica;
- Las altamente plásticas o muy porosas, cuya deformación elástica es insignificante.

Las propiedades elásticas de las rocas se caracterizan por el módulo de elasticidad "E" y el coeficiente de Poisson "v".<sup>16</sup>

**a. El módulo de Elasticidad:** Es el factor de proporcionalidad entre la tensión normal en la roca y la deformación relativa correspondiente, su valor en la mayoría de las rocas varía entre  $0,03 \times 10^4$  y  $1,7 \times 10^5$  MPa, dependiendo fundamentalmente de la composición mineralógica, porosidad, tipo de deformación y magnitud de la carga aplicada.

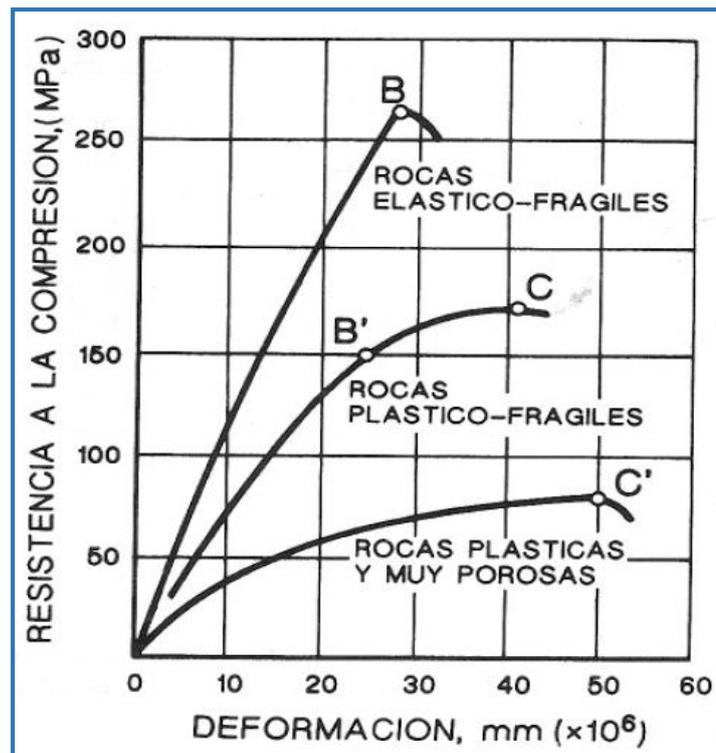
Los valores de los módulos de elasticidad en la mayoría de las rocas sedimentarias son inferiores a los de los minerales correspondientes que los constituyen. También influye en dicho parámetro la textura de la roca, ya que el módulo de elasticidad en la dirección de la estratificación o esquistosidad es generalmente mayor que en la dirección perpendicular a ésta.

---

<sup>16</sup> Ing. Carlos A. CANOBA, Propiedades elásticas de las Rocas, Departamento de Ciencias Geológicas, universidad Nacional del Rosario, 2004

- b. **El coeficiente de Poisson:** Es el factor de proporcionalidad entre las deformaciones longitudinales relativas y las deformaciones transversales. Para la mayoría de las rocas y minerales está comprendido entre 0,2 y 0,4, y sólo el cuarzo lo tiene anormalmente bajo, alrededor de 0,07.

**Figura N° 13:** Coeficiente de Poisson



**Fuente.** Dr. Rolando Carrascal, Cartografía Hidrogeológica, Escuela Geológica FIGMM - UNI, Lima – Perú, 2008.

#### 2.1.7.4. ABRASIVIDAD:

*Según López Jimeno, comenta:* “La abrasividad es la capacidad de las rocas para desgastar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro, en el proceso de rozamiento durante el movimiento”.

Los factores que elevan la capacidad abrasiva de las rocas son las siguientes:

- La dureza de los granos constituyentes de la roca.
- Las rocas que contienen granos de cuarzo son sumamente abrasivas.
- La forma de los granos.
- Los más angulosos son más abrasivos que los redondeados.
- El tamaño de los granos.
- La porosidad da lugar a superficies de contacto rugosas con concentraciones de tensiones locales.
- La heterogeneidad.

Las rocas poliminerales, aunque éstos tengan igual dureza, son más abrasivas, pues van dejando superficies ásperas con presencia de granos duros, por ejemplo, los granos de cuarzo en un granito.

Esta propiedad influye mucho en la vida de los accesorios de perforación.

**Tabla N° 06:** Contenidos medios de diferentes tipos de roca.

TIPO DE ROCA	CONTENIDO EN CUARZO (%)	TIPO DE ROCA	CONTENIDO EN CUARZO (%)
Anfibolita	0 - 5	Mica neis	0 - 30
Anortosita	0	Mica esquisto	15 - 35
Diabasa	0 - 5	Norita	0
Diorita	10 - 20	Pegmatita	15 - 30
Gabro	0	Filita	10 - 25
Neis	15 - 50	Cuarcita	60 - 100
Granito	20 - 35	Arenisca	25 - 90
Grauvaca	10 - 25	Pizarra	10 - 35
Caliza	0 - 5	Pizarra grano fino	0 - 20
Mármol	0	Taconita	0 - 10

**Fuente.** Dr. Rolando Carrascal, Cartografía Hidrogeológica, Escuela Geológica FIGMM - UNI, Lima – Perú, 2008.

#### **2.1.7.5. TEXTURA**

*Según López Jimeno, comenta:* “La textura de una roca se refiere a las características de los granos de minerales constituyentes de ésta. Se manifiesta a través del tamaño de los granos, la forma, la porosidad, etc.”.

Todos estos aspectos tienen una influencia significativa en el rendimiento de la perforación. Cuando los granos tienen forma lenticular, como en un esquisto, la perforación es más difícil que cuando son redondos, como en una arenisca.

También influye de forma significativa el tipo de material que constituye la matriz de una roca y que une los granos de mineral.

En cuanto a la porosidad, aquellas rocas que presentan una baja densidad y son consecuentemente más porosas tienen una menor resistencia a la trituración y son más fáciles de perforar.

#### **2.1.7.6. ESTRUCTURA**

Las propiedades estructurales de los macizos rocosos, tales como esquistosidad, planos de estratificación, juntas, diaclasas y fallas, así como el rumbo y el buzamiento de éstas afectan a la linealidad de las tuberías de perforación, a los rendimientos de perforación y a la estabilidad de las paredes de los taladros.

#### **2.1.10. MÉTODOS DE PERFORACIÓN PARA SONDEOS**

En la perforación de sondeos se realiza fundamentalmente la destrucción de la roca en el fondo del taladro, en trozos más o menos pequeños denominados detritus; la elevación del detritus a la superficie: el mantenimiento de las paredes del sondeo. Se consigue temporalmente mediante la presión hidrostática de la columna constituida por el lodo de

perforación, la formación de la costra cuando se utilicen lodos y la colocación de una columna de revestimiento o entubación, el principal método aplicado para la perforación de pozos de agua es el Método de Perforación Rotopercutivo y el Rotativo.

#### **2.1.8.1. MÉTODO DE PERFORACIÓN ROTOPERCUTIVO:** <sup>17</sup>

El principio de perforación de estos equipos, se basa en el impacto de una pieza de acero (pistón) que golpea a un útil que a su vez transmite la energía al fondo de los accesorios de perforación, por medio de un elemento final (broca).

Los equipos rotopercutivos se dividen en dos grandes grupos, según donde se encuentre colocado el martillo.

- *Martillo en Cabeza:* En estos perforadores dos de las acciones básicas, rotación y percusión, se producen fuera del barreno, transmitiéndose a través de una espiga y del varillaje hasta la boca de perforación. Los martillos pueden ser de accionamiento neumático o hidráulico.
- *Martillo en Fondo:* La percusión se realiza directamente sobre la broca de perforación, mientras que la rotación se efectúa en el exterior de las tuberías de perforación. El accionamiento del pistón se lleva a cabo neumáticamente, mientras que la rotación puede ser neumática o hidráulica actualmente este es el principio de perforación que ha dado mejores resultados en la perforación de piezómetros y pozos de agua en la diferentes minas a cielo abierto en el Perú.

Las ventajas de emplear el método rotopercutivo en perforación de pozos de agua y piezómetros como en perforaciones para voladura son:

- Es aplicable a todos los tipos de roca, desde blandas a duras.

---

<sup>17</sup> Carlos y Emilio López Jimeno, "Manual de Perforación y Voladura de Rocas", Madrid, 2003

- La gama de diámetros son versátiles, pues se adaptan bien a diferentes trabajos y tienen una gran movilidad.
- Necesitan un solo hombre para su manejo y operación.
- El mantenimiento es fácil y rápido.

#### a. Fundamentos de la Perforación Rotopercutiva

Este método se basa en la combinación de las siguientes acciones:

- **Percusión:** Los impactos producidos por el golpeo del pistón originan unas ondas de choque que se transmiten a la boca a través del varillaje (en el martillo en cabeza) o directamente sobre ella (en el martillo en fondo), por lo que el rendimiento es mayor.

La energía cinética ( $E_c$ ) del pistón se transmite desde el martillo hasta la broca de perforación, a través del varillaje, en forma de onda de choque. El desplazamiento de esta onda se realiza a alta velocidad y su forma depende fundamentalmente del diseño del pistón.

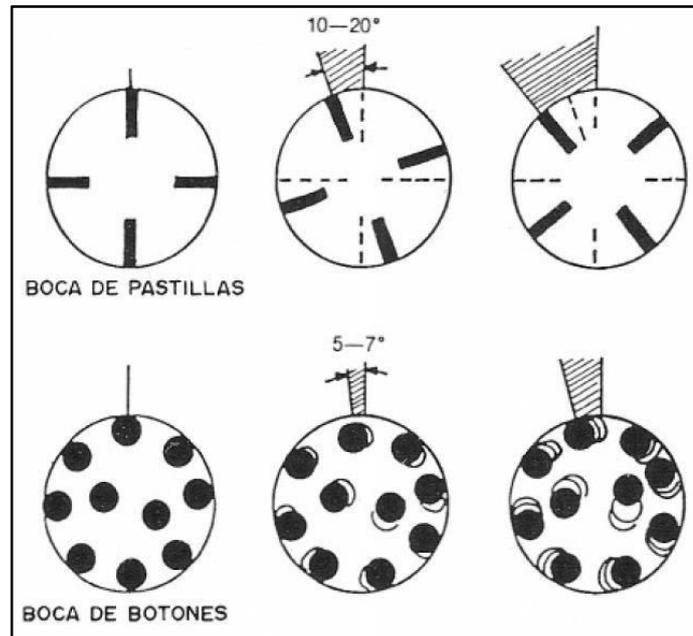
- **La Rotación:** La rotación, que hace girar la broca entre impactos sucesivos, tiene como misión hacer que ésta actúe sobre puntos distintos de la roca en el fondo del barreno.

En cada tipo de roca existe una velocidad óptima de rotación para la cual se producen el detritus de mayor tamaño al aprovechar la superficie libre del hueco que se crea en cada impacto.

Cuando se perfora con brocas de pastillas las velocidades de rotación más usuales oscilan entre 80 y 150 rpm, con unos ángulos entre indentaciones de 10° a 20°.

En el caso de brocas de botones de 51 a 89 mm las velocidades deben ser entre 40 y 60 rpm, que proporcionan ángulos de giro entre 5° y 7°; las bocas de mayor diámetro requieren velocidades incluso inferiores.

**Figura N° 13.** Velocidades de rotación para Brocas de pastillas y Botones



**Fuente.** Carlos y Emilio López Jimeno, "Manual de Perforación y Voladura de Rocas", Madrid, 2003

- **Empuje:** La energía generada por el mecanismo de impactos del martillo debe transmitirse a la roca, por lo que es necesario que la broca se encuentre en contacto permanente con el fondo del barreno. Esto se consigue con la fuerza de empuje suministrada por un motor o cilindro de avance, que debe adecuarse al tipo de roca y broca de perforación.

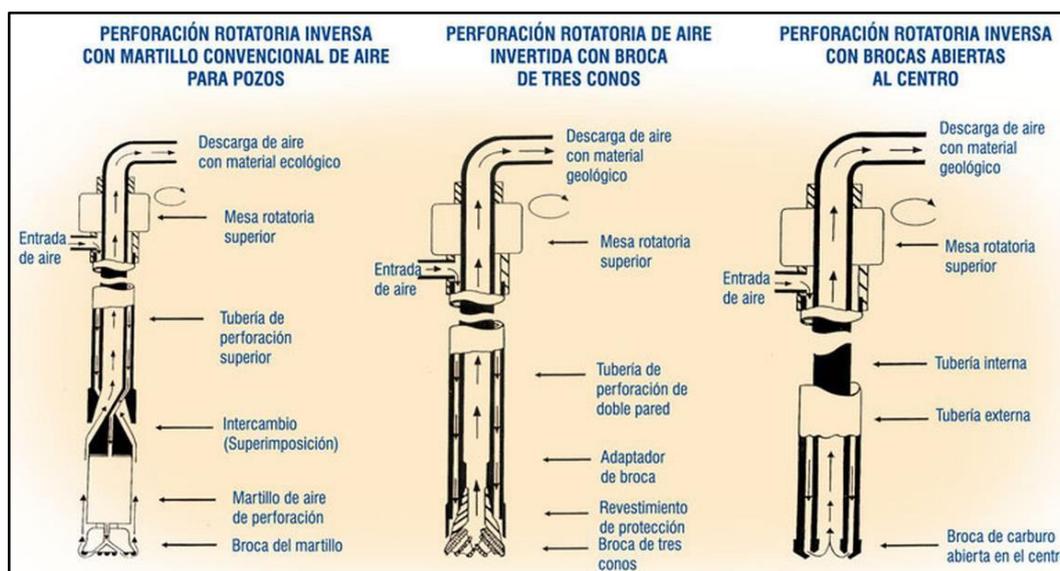
Un empuje insuficiente tiene los siguientes efectos negativos: reduce la velocidad de penetración, produce un mayor desgaste de varillas y manguitos, aumenta la pérdida de apriete del varillaje y el calentamiento del mismo. Por el contrario, si el empuje es excesivo disminuye también la velocidad de perforación, dificulta el desenroscado del varillaje, aumenta el desgaste de las brocas, el par de rotación y las vibraciones del equipo, así como la desviación de los barrenos.

- **Barrido:** Para que la perforación resulte eficaz, es necesario que el fondo de los barrenos se mantenga constantemente limpio evacuando el detrito justo después de su formación.

Si esto no se realiza, se consumirá una gran cantidad de energía en la trituración de esas partículas traduciéndose en desgastes y pérdidas de rendimientos, además del riesgo de atascos. El barrido de los barrenos se realiza con un fluido aire, agua o lodo de perforación, dependiendo de las características del terreno, que se inyecta a presión hacia el fondo a través de un orificio anular de la tubería de perforación.

Las partículas se evacúan por el tubo interior de las tuberías de perforación por efectos de los fluidos de perforación.

**Figura N° 14.** Principio de barrido.



**Fuente.** Instituto de Ingenieros de Minas del Perú

El aire comprimido cumple con las siguientes funciones:

- Enfriar y lubricar los cojinetes del tritono.
- Limpiar el fondo de barreno.
- Elevar el detrito con una velocidad ascensional adecuada.

El aire circula por un tubo desde el compresor hasta el mástil y desde este, por manguera flexible protegida, a la cabeza de rotación, de donde pasa al interior de la barra de perforación que lo conduce hasta la broca, saliendo entre los conos para producir la remoción del detritus elevándolos hasta la superficie. Si los trozos son grandes y el caudal de aire insuficiente vuelve a caer al fondo, produciéndose su remolienda hasta alcanzar el tamaño adecuado para ascender. La falta de aire produce así un consumo de energía innecesario, una menor velocidad de penetración y un mayor desgaste de la broca. El barrido con agua se emplea para suprimir el polvo, aunque supone una pérdida de rendimiento del orden de 10% - 20%, el barrido con agua se usa también en la recuperación de muestra con presencia de agua.

El barrido con lodos de perforación ayuda a la elevación de partículas gruesas hasta la superficie y ejerce un efecto de sellado, libre las paredes de los barrenos. El barrido con lodos de perforación se usa para la estabilización de las paredes del taladro.

#### **2.1.8.2. MÉTODO DE PERFORACIÓN ROTATIVA<sup>18</sup>**

Los cambios de las rotaciones hace también necesario no solo el cambio de diámetro de broca si no también el cambio de sistema de perforación, en el caso de encontrar agua subterránea, la misma que amortigua, los impactos de martillo en el fondo, elevado exageradamente el tiempo de penetración, por lo que es necesario sustituir el sistema de rotopercusión (broca de bits) por el sistema de ROTACION (broca tricónica). Produciéndose estos cambios en la mayoría de los casos a altas profundidades y con excesivo caudal de agua.

Este sistema se aplica cambiando el montaje de fondo por un sistema de circulación directa el cual lleva un tricono de diámetro adecuado a este tipo

---

<sup>18</sup> Carlos y Emilio López Jimeno, "Manual de Perforación y Voladura de Rocas", Madrid, 2003

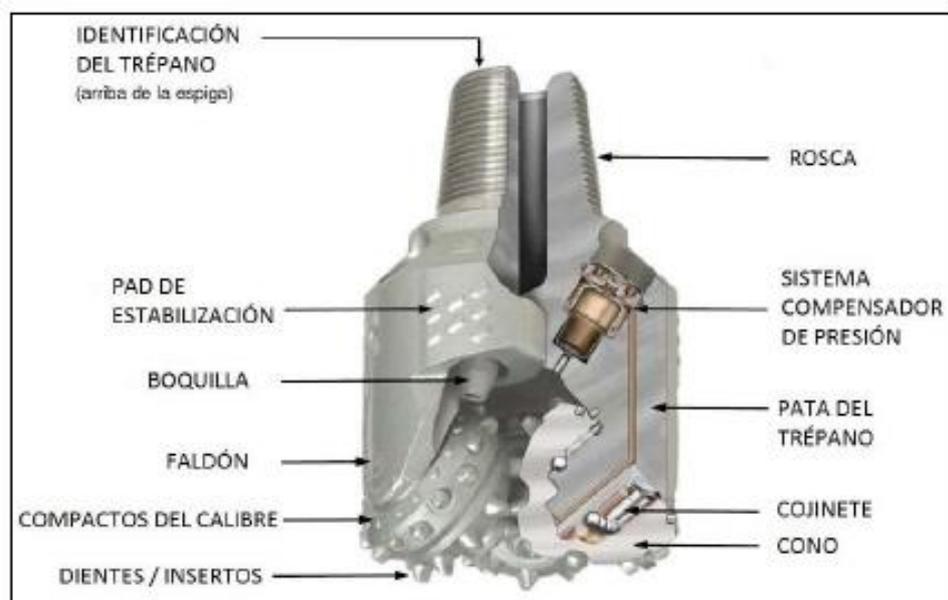
de perforación. Aun realizando un buen control, con este sistema existen demasiados problemas cuando se perfora a altas profundidades, para controlar la linealidad de la perforación es por esto que solo se emplea en casos muy extremos y hasta paralizar la perforación.

#### a. Fundamentos de Perforación Rotativa:

Los cambios de las rotaciones hace también necesario no solo el cambio de diámetro de broca si no también el cambio del método de perforación, en el caso de encontrar agua subterránea, la misma que amortigua, los impactos del martillo en el fondo, aumentando el tiempo de penetración, por lo que es necesario sustituir el método de rotopercusión (broca bits) por el método de rotación (broca tricónica).

Produciéndose estos cambios en la mayoría de los casos a altas profundidades y con excesivo caudal de agua.

**Figura N° 15.** Principio de barrido.



**Fuente.** UNIÓN ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS, Manual de Perforación, Madrid, 1990

- **Empuje sobre el tricono.** El empuje aplicado sobre el tricono debe ser suficiente para sobrepasar la resistencia a compresión de la roca, pero no debe ser excesivo para evitar fallos prematuros o anormales del tricono.

La velocidad de penetración aumenta proporcionalmente con el empuje, hasta que se llega a un agarrotamiento del tricono contra la roca por efecto del enterramiento de los dientes o insertos, o hasta que por la alta velocidad de penetración y el gran volumen de detritus que se produce no se limpia adecuadamente el pozo.

En formaciones duras, un empuje elevado sobre la boca puede producir roturas en los insertos antes de presentarse un agarrotamiento o un defecto de limpieza.

También, disminuye la vida de los cojinetes, pero no necesariamente la longitud perforada por el tricono.

Cuando se perfora una roca, los triconos pueden trabajar en tres situaciones distintas:

- Empuje insuficiente
- Avance eficiente y
- Enterramiento del útil.

El «empuje mínimo», por debajo del cual una roca no es perforada, puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$E_m = 28,5 \times RC \times D$$

**Donde:**

$E_m$  = Empuje mínimo (libras).

$RC$  = Resistencia a compresión de la roca (MPa).

$D$  = Diámetro del tricono (pulg).

El «empuje máximo», por encima del que se produce el enterramiento del tricono, se considera que vale el doble del valor anterior.

$$E_M = 2 \times E_m$$

El «empuje límite» que soporta un tricono es función del tamaño de sus cojinetes, que, a su vez, depende del diámetro del tricono:

$$E_L = 810 \times D^2$$

**Donde:**

EL = Empuje límite del tricono (libras).

D = Diámetro (pulg).

**Tabla N° 07:** Principio de barrido.

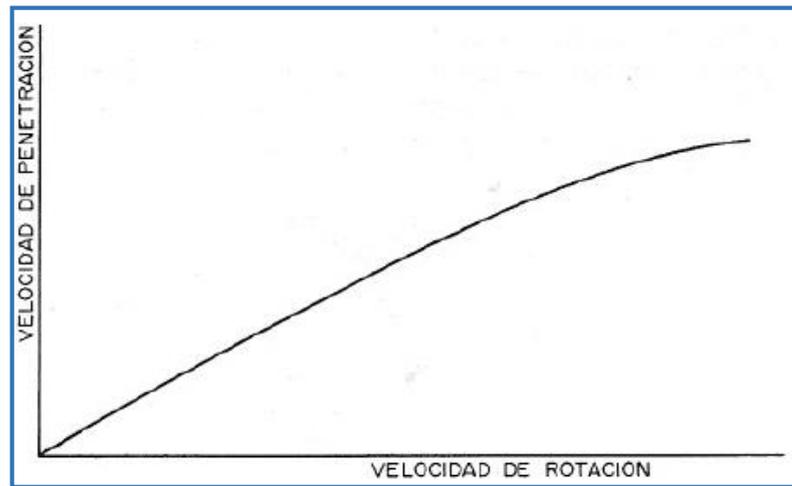
DIAMETRO DEL TRICONO (pulg)	EMPUJE LIMITE (libras)
5 <sup>1/8</sup>	21.000
6 <sup>1/4</sup>	31.000
6 <sup>3/4</sup>	37.000
7 <sup>7/8</sup>	50.000
9	65.000
9 <sup>7/8</sup>	79.000
12 <sup>1/4</sup>	121.000

**Fuente.** Carlos y Emilio López Jimeno, “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”, Madrid, 2003

- **Velocidad de rotación:** La velocidad de penetración aumenta con la velocidad de rotación en una proporción algo menor que la unidad, hasta un límite impuesto por la evacuación del detritus.

Las velocidades de rotación varían desde 60 a 120 RPM para los triconos con dientes de acero y 50 a 80 RPM para los de insertos de carburo de tungsteno.

**Figura N° 16:** Principio de barrido.



**Fuente.** Carlos y Emilio López Jimeno, “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”, Madrid, 2003

**Tabla N° 08:** Velocidades de rotación adecuadas para diferentes tipos de roca.

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD DE ROTACION(r/min)
Blanda	75 - 160
Media	60 - 80
Dura	35 - 70

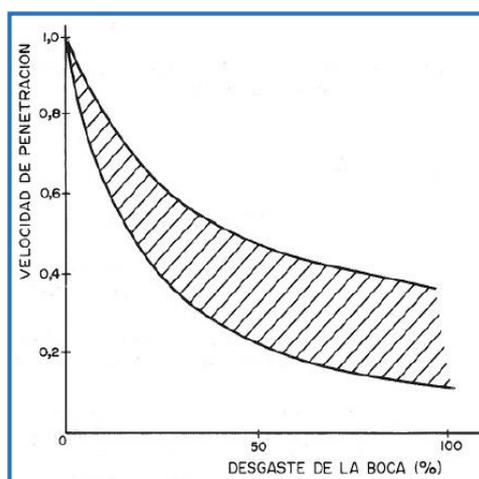
**Fuente.** Carlos y Emilio López Jimeno, “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”, Madrid, 2003

El límite de la velocidad de rotación está fijada por el desgaste de los cojinetes, que a su vez depende del empuje, de la limpieza del pozo y de la temperatura; y por la rotura de los insertos que es provocada por el impacto del tricono contra la roca, siendo la intensidad de éste proporcional al cuadrado de la velocidad de rotación.

- **Desgaste del tricono:** Cuando se utilizan triconos de dientes, la velocidad de penetración disminuye considerablemente conforme aumenta el desgaste de la boca.

La siguiente figura, muestra cómo para un tricono a mitad de uso, la velocidad de penetración puede reducirse de un 50 a un 75% con respecto a la obtenida con un tricono nuevo.

**Figura N° 17:** Desgaste del tricono



**Fuente.** Carlos y Emilio López Jimeno, “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”, Madrid, 2003

- **Diámetro de perforación:** Se refleja cómo la velocidad de penetración obtenida con empuje y velocidad de rotación constantes es proporcional al inverso del diámetro de perforación al cuadrado.
- **Caudal de aire:** Cuando la perforación se efectúa con menos aire que el necesario para limpiar con efectividad el pozo, se producen los siguientes efectos negativos:
  - Disminución de la velocidad de penetración.
  - Aumento del empuje necesario para perforar.

- Incremento de las averías de la perforadora, debido al mayor par necesario para hacer girar el tricono.
- Aumento del desgaste en el estabilizador, en la barra y en el tricono.

#### b. Selección del Tipo de Tricono:

En la selección del tipo de tricono influyen fundamentalmente la resistencia a compresión de la roca y su dureza. Normalmente, los usuarios envían muestras a las compañías fabricantes de triconos para que asesoren sobre el tipo de boca a utilizar, velocidades de penetración probables y duración en metros. Los triconos de dientes se clasifican en tres categorías, según el tipo de formación rocosa: blanda, media y dura.

- **Formaciones blandas:** Los triconos para formaciones blandas tienen rodamientos pequeños compatibles con los dientes largos y los pequeños empujes sobre la boca que son necesarios. Los dientes están separados y los conos tienen un descentramiento grande para producir un efecto de desgarre elevado.

**Figura N° 18:** Tricono para formaciones blandas



**Fuente.** Instituto Tecnológico Geominero de España.

- **Formaciones medias:** Los triconos para estas formaciones tienen cojinetes de tamaño medio, de acuerdo a los empujes necesarios y el tamaño de los dientes. La longitud de los dientes, espaciamiento y descentramiento son menores que en los triconos de formaciones blandas.

**Figura N° 19:** Tricono para formaciones medias



**Fuente.** Instituto Tecnológico Geominero de España.

- **Formaciones duras:** Los triconos de formaciones duras tienen cojinetes grandes, dientes cortos, resistentes y muy próximos unos de otros. Los conos tienen muy poco descentramiento para aumentar el avance por trituración, requiriéndose empujes muy importantes.

**Figura N° 20:** Tricono para formaciones duras



**Fuente.** Instituto Tecnológico Geominero de España.

#### **2.1.11. SELECCIÓN DE EQUIPOS DE PERFORACIÓN**

El equipo de perforación necesario para obtener un pozo, estable para la instalación de un piezómetro y un pozo de producción de agua dependerá de la geología, hidrología, del emplazamiento y la profundidad requerida para la instalación, debiendo tener las siguientes características de funcionamiento.

##### **2.1.11.1. PARTES DE LA PERFORADORA.**

- a. Brazo articulado.** Podemos considerarlo como el elemento de unión entre el chasis y la corredera o columna. Puede efectuar movimientos de oscilación, inclinación, subida y descenso, lo que facilita el posicionamiento de la citada columna.
- b. Corredero o columna.** Guía rígida, unida al brazo articulado, a lo largo de la cual se desliza el grupo perforador mediante una transmisión por cadena que avanza o retrocede gracias a la acción del denominado motor de avance.

- c. Motor de avance.** Como hemos indicado en el apartado anterior la cadena puede avanzar o retroceder, lo que requiere que el motor sea reversible para poder realizar este cometido.
- d. Motor de accionamiento del martillo.** Aquí debemos dos sistemas de funcionamiento: de martillo en cabeza u de martillo en fondo.
- En el primer caso el motor consta de una unidad de percusión y una unidad de rotación que transmiten estos movimientos a la boca de perforación, a través del varillaje.
  - En el segundo caso, el motor solamente genera la rotación, transmitiéndola al martillo a través de los tubos de acero del varillaje.

La percusión se consigue en el mismo martillo al actuar el aire inyectado a través de los tubos sobre el mecanismo que este lleva en su interior.

En ambos sistemas el aire es introducido por el interior de los tubos que constituyen el varillaje. En el caso de martillo en cabeza solo se utiliza para el barrido del ripio y en el fondo además de ejecutar el barrido, hace funcionar el mecanismo de percusión.

- e. Tuberías de Perforación.** Elementos transmisores de la acción del motor. Tienen diferentes calibres que dependen, como es lógico, del diámetro que se quiera dar a la perforación, la longitud de ésta naturaleza del terreno, la potencia de la máquina, su sistema de funcionamiento, entre otros.
- f. Chasis Autoportante.** El chasis autoportante, en esencia, consiste en un armazón sobre el que va el mecanismo de perforación, los motores de desplazamiento, los mandos y en algunos casos, si el carro dispone de él, el colector de polvo.

También el compresor que algunas veces solo se utiliza para el barrido y otras además para la tracción y la perforación (carros neumáticos), puede estar incorporado y montando sobre el chasis. Otras veces es independiente y en este caso es remolcado por el propio carro o por otro vehículo, del mismo modo el colector puede instalarse separadamente del chasis.

Las orugas, órganos de translación que suelen presentar la característica de oscilar independientemente, son accionadas también independientemente, por motores de tracción. La oscilación proporciona un desplazamiento más suave en terrenos abruptos y ayuda en el posicionamiento. Para favorecer la estabilidad pueden utilizarse calces.

Los mandos, por lo general, están en dos paneles según cuál sea su cometido. En un panel, situado preferentemente en la parte lateral o trasera, se suelen encontrar los mandos que accionan los mecanismos de translación y posicionado, y en la parte delantera en las proximidades de la base de la corredera, es decir, en el lugar desde donde se puede controlar mejor el desarrollo de las operaciones se localizan los mandos de perforación.

Estos son a “grosso modo” los componentes básicos de un carro perforador. Existen otros, opcionales, que lógicamente mejoran las prestaciones de la máquina. Básicamente el carro perforador consta de 2 partes: mecanismos de perforación propiamente dicho y chasis autoportante.

#### **2.1.11.2. CARACTERÍSTICAS MÁS ADECUADAS QUE DEBE TENER UN EQUIPO.**

- a. Sistema de Avance.** Dentro de los sistemas de avance tenemos empujadores, deslizadores de cadena, deslizadores de tornillo,

deslizadores de cable, deslizaderas hidráulicas que es el sistema más adecuado para perforación de pozos.

- b. Deslizaderas Hidráulicas.** El rápido desarrollo de la hidráulica en la última década ha hecho que este tipo de deslizaderas incluso se utilice en perforadoras neumáticas el sistema consta de un cilindro hidráulico que desplaza a la perforadora a lo largo de la viga de soporte.

Las deslizaderas hidráulicas presentan las siguientes ventajas:

- Simplicidad y Robustez.
- Facilidad de control y precisión.
- Capacidad para perforar grandes profundidades.
- Adaptabilidad a gran variedad de máquinas y longitud de pozos.

- c. Sistemas de Montaje para Perforación de pozos:** En trabajos de perforación de pozos, los sistemas de montajes de las perforadoras son con chasis ligeros con neumáticos y sobre camiones, las perforadoras van montadas sobre las deslizaderas, las cuales pueden girar en un plano vertical sobre una barra o soporte transversal.

Ejemplo de algunas marcas conocidas de perforadoras de pozos con estas características:

- Máquina Perforadora EMAX 400 con compresor INGERSOL RAND 750 CFM/ 180PSI montada sobre MACK DM 600 TANDEM AXLE, equipada para perforar hasta 450”.
- Máquina perforadora SCHRAMM T 64 HB con compresor SCHRAMM 600 CFM/350PSI montada sobre GMC 7500 TANDEM AXLE, equipada para perforar hasta 800”.
- Máquina perforadora SCHRAMM T 64 HB con compresor SULLAIR 75° CFM/350 PSI montada sobre GMC 7500 TANDEM AXLE, equipada para perforar hasta 900”.

- Máquina Perforadora FOREMOST BARBER DR-24 con compresor SULLARI de CFM.

### **2.1.11.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UNA PERFORADORA TEREX**

#### **a. Torre de perforación**

- Capacidad de sacar barras de 6.10 metros.
- Capacidad angular desde la vertical hasta 60°
- Doble punto de pivote del soporte de la torre.
- 6 m de deslizamiento de la torre.
- Soporte deslizador de barras ajustable.

#### **b. Motor Diesel**

- Detroit Diesel GM12V71N
- 306 kw (410 hp) @ 1800 rpm
- Cubierta standard aislante para reducir el ruido

#### **c. Cabezal de rotación Standard**

- Cabezal de rotación UDR de dos velocidades.
- Cambio manual Alta –Baja velocidad
- Control de velocidad sin escalones
- 5- 201 rpm en baja, 201-2250 rpm en Alta
- Diseño de husillo flotante.
- Lubricación por chorro de aceite de engranajes y rodamientos
- Cabeza inyectora de lodo de 2000 psi incorporada.

#### **d. Torque de Salida del Cabezal de Rotación.**

- 10, 180 Nm @ 5-210 rpm.
- 1,298 Nm @ 1500 rpm.
- 859 Nm @ 2250 rpm.

**e. Cabezal de Rotación Opcional**

- Cabezal UDR D 30 de dos velocidades
- Cambio manual Alta-Baja velocidad.
- Control de velocidades sin escalones
- 48-200 rpm en Baja, 200-1500 rpm en Alta
- Diseño de husillo flotante
- Lubricación por chorro de aceite de engranajes y rodamientos.
- Cabeza inyectora de lodo de 2000 psi incorporada.

**f. Torque de Salida del Cabezal de Rotación Opcional**

- 25,780 Nm @5-73 rpm
- 3, 438 Nm @ 550 rpm
- 1,260 Nm @ 1500 rpm

**g. Recorrido del Cabezal**

- Cilindro hidráulico sobre cables relación 2:1
- Velocidad máxima de subida de 23.3 m/min.
- Velocidad máxima de bajada de 18.8 m/min.
- Cabezal de rotación abatible hidráulicamente.

**h. Empuje**

- 150 KN (30,000 lbf)

**i. Levante**

- 450 KN (100,000 lbf)
- Winche Principal
- De una línea, montando en la parte superior de la torre.
- Tiro máxima de 390 KN (87,400 lbf)
- Velocidad máxima de 88 m/min
- Mecanismo de freno a prueba de fallas (aplicación mecánica, liberación hidráulica)

- Motor hidráulico con sensor de carga que permite la máxima velocidad de levante según el peso.
- Indicador en winche para registrar la posición del tapón elevador en la torre.

#### **j. Bomba de agua**

- FMC (Bean) L111 8SC.
- 246/ minuto @ 12,400 kPa

#### **k. Corte de Hilos**

- Llave de cadena accionada hidráulicamente
- Torque máxima de 24,400 Nm (18,000 lbf)
- Capacidad de barras desde 83 mm hasta 210 mm
- Herramienta hidráulica opcional de corte de hilos tipo manos libres para barras de aire reverso y rotary.
- Herramienta opcional para el pre torque, atornillado y corte de hilos de barras wireline (Safe-T-Spin)

#### **l. Prensa de Barras**

- Prensa de barras de accionamiento hidráulico y auto energizada
- Mordazas fáciles de sacar.
- Mordazas standard desde 44.5 mm a 177.8 mm.
- Porta mordazas deslizantes para barras de AR
- Mordazas para Casing y barras en los tamaños más usados
- Abertura standard de 500mm en el fondo de la torre.
- Llave deslizante opcional accionada hidráulicamente.

#### **m. Winche Wireline**

- Capacidad de 5500m de cable wireline de 210mm.
- Tiro máximo de 60 KN (tambor vacío)
- Velocidad máxima de 450 m/minuto (tambor lleno)

**n. Sistema Hidráulico**

- Bombas y motores hidráulicos de pistones axiales y radiales.
- Siete circuitos hidráulicos principales de tipo abierto.
- Filtración del aceite de retorno a flujo completo a 10 micrones Beta.
- Mangueras y válvulas de control más grandes que el promedio.

**o. Guardia Protectora de Golpe de Barras**

- Accionada hidráulica
- Se retrae automáticamente
- Elimina el excesivo azote de las barras wireline al perforar a alta velocidad Cierre interconectado hidráulicamente con la rotación.

**p. Características Opcionales**

- Sistema de gatos de levante extendidos para dar un espacio de 3.5 m libres debajo de la placa base.
- Apernado a una plataforma de trabajo elevada con una capacidad de soporte de 400,000 Kg. Debajo del trolley.

**q. Equipo Adicional Opcional**

- Paquete de compresor de 1160 cfm/500 psi montando a bordo.
- Paquete de compresor de 1150 cfm/ 350 psi montando a bordo
- Bomba de lodo accionada hidráulicamente montada a bordo

**r. Opciones de Transporte**

- Montada sobre tráiler de tres ejes.

**2.1.12. LODOS DE PERFORACIÓN.**

El fluido utilizado durante las labores de perforación de un pozo es llamado también lodo de perforación; siendo éste, el componente más importante

que existe durante este proceso. El lodo es un fluido preparado con materiales químicos, en circulando en circuito dentro del agujero por el interior de la tubería, impulsado por bombas y finalmente, devuelto a la superficie por el espacio anular (espacio formado entre la pared del agujero y el diámetro exterior de la tubería).

Los fluidos de perforación son habitualmente suspensiones coloidales (gelatinas) en base a arcillas, en las que el agua se presenta bajo las formas siguientes:

1. Agua libre entre las partículas.
2. Agua adsorbida, es decir, fija rígidamente sobre la superficie de las partículas.
3. Agua adsorbida o de solvatación formando parte integral de las partículas y transformándolas más o menos en gelatina.

El agua adsorbida, depende de la superficie total de las partículas y la de solvatación, de su volumen. Por tanto, para una cantidad de agua determinada, el agua de adsorción será tanto más importante cuánto más pequeña sea la dimensión de las partículas.

Por ejemplo, las bentonitas, cuyas partículas en casi su totalidad tienen una medida inferior a una micra, son excelentes para la fabricación de fluidos de perforación.

- Según *JC Portal, Drilling Supplies*, comenta:

“Los lodos de perforación son fluidos que circulan en los pozos de producción para limpiar y acondicionar la perforación, lubricar la broca de perforación, equilibrar la presión de deformación y para incrementar la resistencia de las paredes del taladro. Los lodos de perforación típicamente usan agua o petróleo y polímeros como fluido base”.

Los lodos de perforación son los fluidos bombeados que circulan a través del pozo mientras este es perforado. Su composición se ajusta a medida

que cambian las exigencias, de acuerdo con la profundidad de la perforación y los otros materiales encontrados.

#### **2.1.10.1. ADITIVOS DE PERFORACIÓN**

##### **a. CONTROLADORES DE PH:**

*Según Geotecnia Peruana, comenta:*

“Sirven para mejorar la calidad del agua adicionando controladores en el caso de que esta sea muy ácida”.

El pH es un parámetro que nos indica el grado de acidez del agua, dependiendo del contenido del ión Hidrógeno.

Cuando el agua es dura (presencia de Ca) se adiciona el controlador de pH y se espera unos 10 a 15 minutos para que se precipite el Calcio y pueda hacerse recién uso del agua para la preparación del fluido.

##### **a.1. Funciones:**

- Se utilizan para mantener un rango de pH en el sistema que asegure el máximo desempeño de los aditivos.
- Como tratamiento cuando el agua usada en la preparación de lodos es ácida y/o muy dura.
- Como función secundaria minimiza la velocidad de corrosión.

##### **a.2. Producto Comercial: SODA ASH (CARBONATO DE SODIO).**

- Polvo blanco muy soluble en agua.
- Empacado en bolsas de plástico de 25 kg.
- Precipita el calcio soluble y eleva el pH

##### **b. ASFALTOS O ESTABILIZADORES:**

Son aditivos derivados del petróleo (hidrocarburo).

**b.1. Funciones:**

- Estabiliza terrenos sueltos y fracturados.
- Cementa y da consistencia al material suelto.
- Inhibe arcillas.

**b.2. Productos Comerciales: Borotex, Poly Plus RD/L/2000**

**BORETEX**

- Polvo marrón oscuro a negro.
- Empacado en sacos de papel de 50 libras.
- Asfalto modificado dispersible en agua.
- Se emplea para combatir la desintegración de las arcillas, para estabilización del pozo y como control de filtrado secundario.

**c. BENTONITA:**

- *Según Geotecnia Peruana, comenta:*

“Es una roca compuesta por más de un tipo de minerales, aunque son las esmécticas sus constituyentes esenciales y las que le confieren sus propiedades muy especiales, particularmente la de hincharse en el agua, dando una masa voluminosa y gelatinosa”

Las bentonitas son llamadas "arcillas activadas" debido a su afinidad en ciertas reacciones químicas causada por su excesiva carga negativa.

**c.1. Los productos comerciales de bentonitas se clasifican:**

- **Bentonita Sódica:** Es una Montmorillonita que se encuentra en forma natural y que contiene un alto nivel de iones de sodio. Se hincha al mezclarse con el agua.
- **Bentonita Cálcica:** Es una Montmorillonita en la que el catión intercambiable predominante es el calcio. No exhibe la capacidad de hinchamiento de la bentonita sódica, pero tiene propiedades absorbentes.

### **c.2. Ventajas:**

- Desarrollo de alta viscosidad.
- Obtener buen control de filtración
- Obtener buena lubricación.
- Pared de filtración delgada y consistente.
- Fuerza de gel necesaria para suspender los recortes, cuando el fluido de perforación esta en reposo.
- Acarreo de los recortes de la perforación a la superficie.

### **d. POLÍMEROS:**

*Según Geotecnia Peruana, comenta:*

“Son compuestos químicos cuyas moléculas están formadas por la unión de otras moléculas más pequeñas llamadas monómeros y las cuales se entrelazan entre sí como si fueran los eslabones de una cadena, también pueden presentar ramificaciones o entrecruzamientos”.

Tienen origen natural y artificial. Entre los naturales por ejemplo: el almidón, la celulosa, la lana, la seda y el ADN. Los polímeros al reaccionar con el agua se dispersan y forman cadenas, lo que les da una apariencia mucosa (viscoso).

Para efectos de perforación se usan dos tipos de polímeros: PHPA y PAC.

#### **d.1. PHPA (Poliacrilamida Parcialmente Hidrolizada):**

- Inhibir arcillas.
- Viscosificar fluido de perforación.

#### **d.2. PAC (Poliacrilato):**

Cuyas funciones principales son:

- Controlar la filtración (formando pared junto a la bentonita para evitar que la roca absorba agua)
- Inhibir las arcillas (pero en menor grado que los PHPA)

Por contacto con el agua, incrementa su estructura molecular (viscosidad). Bloquean la hidratación y la dispersión que suele producirse cuando se perfora arcilla, por encapsulamiento (inhibición).

#### **e. SURFACTANTES.**

*Según Geotecnia Peruana, comenta:*

“Aditivos que humectan la superficie de la herramienta, formando una película de lubricación y evitando que se peguen las arcillas”.

Estos permiten que las vías de agua de la broca queden limpias y no se taponen e igualmente evita que se pegue la tubería por efectos de hinchamiento de las arcillas.

Principales funciones:

- Lubrica broca.
- Inhibe las arcillas.
- Se emplean con el propósito de reducir la viscosidad del fluido químicamente, (punto cedente) y para dispersar anillos de arcilla.

#### **e.1. Productos Comerciales: Ring Free Plus**

- Líquido amarillo claro o incoloro.
- Envasado en baldes o bidones de 5 galones.
- Previene el embolamiento de la corona.
- Dispersa los anillos de arcilla.
- Ayuda a liberar las tuberías atascadas en arcillas pegajosas.

#### **f. CONTROLADORES DE PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN**

(LCM: Lost Circulation Material):

Estos aditivos tienen diverso origen y han sido diseñados para controlar las pérdidas de circulación en los fluidos, a causa principalmente de la presencia de fracturas en la formación rocosa.

Algunos LCM:

- Bentonita en pellets.
- Granulos de gel.
- Fibras.
- Papel Picado.
- Escamas de mica.
- Poly Sweel.

#### **2.1.10.2. FUNCIONES DE LOS LODOS**

- Limpieza de la broca y el fondo del pozo.
- Prevenir la excesiva perdida de fluidos en zonas permeables o con alto grado de fracturación dentro del pozo.
- Proporcionar estabilidad a las paredes del Pozo.
- Controlar las presiones del subsuelo.
- Enfriar y lubricar la broca y las barras de perforación
- Prevenir la formación de cavernas en lo taladros. prevenir cohesión en las barras de perforación y desgaste prematuro.
- Obtener mejor recuperación del núcleo (Core) en formaciones fracturadas.
- Obtener muestras geológicas.
- Servir de medio apropiado para las operaciones de registros eléctricos.
- Transmisión de la fuerza hidráulica.

### 2.1.10.3. PROPIEDADES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN.

#### a. pH:

“El pH es un término que indica la concentración de iones hidrógenos en una disolución (mezcla que resulta de disolver cualquier sustancia en un líquido). Se trata de una medida de la acidez de la disolución”.

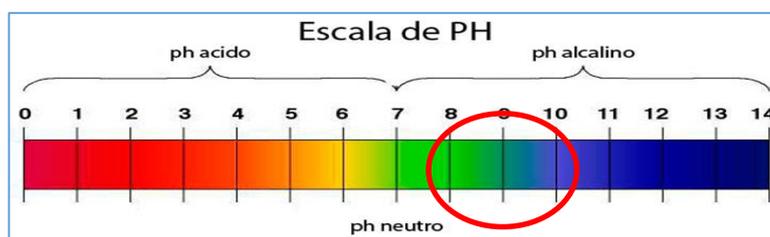
El término se define como el logaritmo de la concentración de iones hidrógeno,  $H^+$ , con signo negativo:

$$PH = - \log [H^+]$$

Donde  $[H^+]$  es la concentración de iones hidrógeno en moles por litro. Debido a que los iones  $H^+$  se asocian con las moléculas de agua para formar iones hidronio,  $H_3O^+$ , el pH también se expresa en términos de concentración de iones hidronio.

Cuando el pH pasa a básico se produce una rápida transformación del amoníaco del agua en amoníaco, caracterizado por una disminución de la concentración de ácido, dando lugar a un pH básico.

**Figura N° 21:** Escala del pH



**Fuente:** MI HHD Mining and Waterwell, Fluidos de Perforación, Rio de Janeiro - Brasil - 2010.

Si  $H_3O^+$  mayor que  $10^{-7}$  = solución ácida y pH menor a 7.

Si  $H_3O^+$  menor que  $10^{-7}$  = solución básica y pH mayor a 7.

En un lodo nuevo el pH está en un rango de 7 a 9,5 (rango óptimo); es decir en la zona del punto isoeléctrico de suspensión formada por el lodo.

Fuera de esta zona aparece la floculación; en donde se afecta la viscosidad y el agua libre.

La vigilancia de este valor permite descubrir rápidamente algunos contaminantes del lodo por el terreno o las aguas del pozo; y por las cementaciones. Estas últimas dan un pH de 11,5 a 12,5.

**El PH inadecuado produce:**

- Bajo rendimiento de los aditivos.
- Baja viscosidad
- Pobre desarrollo del Gel
- Bajo control de filtración

**Observaciones:**

- Para PH bajo < Valores de 7 - 1>: Se utiliza el (controlador de pH).
- Para PH alto <Valores de 10 - 14>: Se utiliza bicarbonato de Na.
- Una variación sustancial del pH debida por ejemplo a la perforación de formaciones evaporíticas, salinas, calcáreas u horizontes acuíferos cargados de sales, puede provocar la floculación del lodo, produciéndose posteriormente la sedimentación de las partículas unidas.
- La estabilidad de la suspensión de bentonita en un lodo de perforación es esencial para que cumpla su función como tal, por lo que será necesario realizar un continuo control del pH mediante la utilización de papeles indicadores o pH-metros.
- Un lodo bentonítico es estable cuando su pH está comprendido entre 7 y 9,5; precipitando fuera de este rango.

**b. VISCOSIDAD:**

“La viscosidad es la principal característica de la mayoría de los productos lubricantes. Es la medida de la fluidez o el espesor del lodo a determinadas temperaturas”.

Si la viscosidad es demasiado baja la película lubricante no soporta las cargas entre las piezas y desaparece del medio sin cumplir su objetivo de evitar el contacto metal - metal.

Si la viscosidad es demasiado alta, el lubricante no es capaz de llegar a todos los intersticios en donde es requerido. Al ser alta la viscosidad, es necesaria mayor fuerza para mover el lubricante originando de esta manera mayor desgaste en la bomba de lodos.

La viscosidad debe ser la menor posible para disminuir las pérdidas de carga debidas al flujo del lodo y la potencia de la bomba, así como para permitir una buena separación de las partículas de arena arrastradas por el fluido de perforación o lodo.

Tampoco debe ser demasiado baja, para evitar que durante la perforación se sedimenten en el pozo las partículas inertes.

“Es la resistencia interna de un fluido a circular. Define la capacidad del lodo de lograr una buena limpieza del útil de perforación, de mantener en suspensión y desalojar los detritus y de facilitar su decantación en las balsas o tamices vibrantes”.

La viscosidad está ligada al estado eléctrico del fluido de perforación, es decir a su pH. Es la que asegura la continuidad de la costra frente a los horizontes impermeables. Se mide o expresa en poises, centipoises.

**Observaciones:**

- La viscosidad del lodo se determina a pie de sondeo mediante el denominado "embudo Marsh", y según normas API, expresándose

por el tiempo (en segundos) que tarda en salir por un orificio calibrado un determinado volumen de lodo.

- Unidad de medida según el embudo se expresa en segundos por un cuarto de galón (seg/qt).
- La viscosidad del agua es de 26 segundos/quart
- Perforación minería: Rango normal 32 hasta 50 seg/qt
- Perforación de pozos de agua rango normal 35 a 60 seg/qt.

Arena Fina: 35 – 45

Arena Mediana: 45 – 55

Arena Gruesa: 55 – 65

Grava: 65 – 75

Grava Gruesa: 75 – 85

- Trabaja en conjunto con la velocidad anular para asegurar una limpieza adecuada.

- Ajustando la viscosidad:

Se incrementa agregando viscosificantes (bentonita, polímeros)

Se reduce agregando agentes diluyentes (agua, dispersantes).

Es preciso adoptar, por tanto, una solución de compromiso: viscosidad no muy grande para que el lodo sea fácilmente bombeable, pero no tan pequeña que impida al lodo extraer el detritus producido.

### **c. CONTENIDO DE CALCIO:**

“Se le conoce como dureza del agua, el calcio retarda la hidratación de la bentonita y los polímeros”.

El agua que contiene una gran cantidad de sales disueltas de calcio y magnesio se denomina “agua dura”, se clasifican de la siguiente manera:

- Blandas las que presentan un valor entre 0-50 ppm CaCO<sub>3</sub>,

- Ligeramente entre 51-100 ppm CaCO<sub>3</sub>,
- Moderadamente duras entre 101-200 ppm CaCO<sub>3</sub>
- Muy duras para valores mayores de 200 ppm CaCO<sub>3</sub>

La dureza del agua en el hogar suele ser indicada por lo difícil que resulta hacer espuma con el jabón.

Cuanto más dura sea el agua, mas bentonita y otros aditivos son necesarios, para obtener propiedades satisfactorias. Las Bentonitas pierden efectividad en agua que contiene más de 240 mg/l de Ca<sup>2+</sup>. Los polímeros PHPA precipitan cuando la concentración de Calcio excede los 300 mg/l.

#### **Medida de la dureza del Agua:**

- 1 ml del agua + 20 ml de agua destilada.
- Añadir 1 ml de solución amortiguadora fuerte (base de NH<sub>4</sub>OH).
- Añadir unas 6 gotas de Calmagite y mezclar.
- Un color rojo tinto aparecerá si la muestra contiene Ca y/o Mg.
- Valorar con Solución de Versenato.
- Punto final de Valoración: la muestra se vuelve azul por primera vez, sin que quede ningún rastro de rojo.

#### **Cálculos:**

$$\text{Dureza Ca}^{2+} \text{ (mg/l)} = \frac{\text{ml. de Versenato} \times 400}{\text{ml. de muestra}}$$

#### **d. DENSIDAD:**

“Define la capacidad del lodo de ejercer una contrapresión en las paredes de la perforación, controlando de este modo las presiones litostática e hidrostática existentes en las formaciones perforadas”.

La densidad, es una característica de cada sustancia. En el caso de los fluidos de perforación, se define como el cociente entre la masa del fluido y

el volumen que ocupa. El valor de la densidad de un fluido de perforación suele ser aproximadamente 1,2 g/cm<sup>3</sup>.

Puede aumentarse para impedir la entrada en el pozo de algunos mantos cautivos de agua; luego la presión diferencial que debe emplearse a de ser por lo menos de 25 a 30 kg/cm<sup>2</sup>.

La arcilla diluida en el agua no permite sobrepasar un valor de 1,4; por encima del cual los lodos no son bombeables. Entonces se carga el lodo con productos como pirita, siderita, galena o barita, en cuyo caso la densidad del lodo puede llegar a 2,4. El lodo denso ejerce contra las paredes del pozo una contra presión que mantiene las formaciones en su sitio.

En los lodos preparados para perforar pozos para agua, las densidades oscilan entre 1,04 y 1,14 sin que sean más eficaces cuando se sobrepasa esta cifra e incluso pueden aparecer problemas de bombeo y peligro de tapar con ellos horizontes acuíferos. Además, el aumento de la densidad del lodo no tiene un efecto grande en el mantenimiento de las paredes del pozo, más bien, es mayor la influencia de sus propiedades tixotrópicas y la adecuación de los restantes parámetros a la litología y calidad de las aguas encontradas.

La densidad tiene una influencia directa en la capacidad de extracción del detritus, pues al regirse, de forma aproximada por la ley de Stoke es proporcional a la densidad del flujo considerado:

$$v = \frac{1}{18} d^2 \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\mu}$$

**Observaciones:**

- La densidad óptima de un lodo debe de ser de 9 lb/galón a menos.
- Fluidos de alta densidad pueden causar daños en las formaciones.

- Altos contenidos de sólidos pueden causar problemas de desarrollo del pozo.
- Para reducir la densidad se emplea agua.
- La medida de la densidad se realiza usando una balanza expresado gr/cm<sup>3</sup>.

**e. CONTENIDO DE ARENA:**

“Cuantas más partículas mayores a 74 micrones existan en el lodo se produce un incremento ficticio de la densidad”.

Los límites deseables son los más bajo como sea posible, en todas las aplicaciones de perforación menor a 2% por volumen de lodo preparado.

Un lodo de perforación en buenas condiciones debe presentar un contenido en fracciones arenosas prácticamente nulo (inferior al 2-3%). Si para su fabricación se usan productos de calidad, debe estar exento de arena. Sin embargo, a lo largo de la perforación y especialmente en acuíferos detríticos, es inevitable que a medida que avance la perforación, el lodo se va a ir cargando en arena, empeorando sus condiciones. Se ha comprobado que con contenidos de arena superiores al 15%, los lodos sufren un incremento "ficticio" de la densidad, repercutiendo en la viscosidad y la tixotropía. Además, el contenido en arena resulta especialmente nocivo para las bombas de inyección al desgastarlas prematuramente.

En general, los sólidos presentes en el lodo afectan las propiedades del mismo. La ROP y los problemas de torque y arrastre están relacionados con el contenido de sólidos.

Un alto contenido puede ocasionar desgaste prematuro de equipo y elevar los costos del lodo. Se evalúa con el kit de arena.

**Medida del Contenido de Arena:**

- Llenar de lodo el tubo medidor de vidrio hasta la marca señalada.

- Añadir agua hasta la siguiente marca.
- Agitar enérgicamente y verter la mezcla sobre la malla, añadir más agua al tubo, agitar y verter de nuevo sobre la malla.
- Repetir hasta que el agua de lavado esté clara.
- Lavar la arena retenida por la malla.
- Colocar el embudo en la parte superior de la malla.
- Introducir el extremo del embudo dentro del orificio del tubo de vidrio, y enjuagar con agua la malla para arrastrar la arena dentro del tubo.
- Leer el porcentaje de volumen de arena en las graduaciones del tubo, luego de asentada.

**f. FILTRACIÓN O PERMEABILIDAD:**

“Es la facilidad o dificultad con la que el agua se desplaza a través de medios discontinuos, denominados estructuras (fallas, fracturas, etc) y/o a través de los poros interconectados entre sí”.

**Observaciones:**

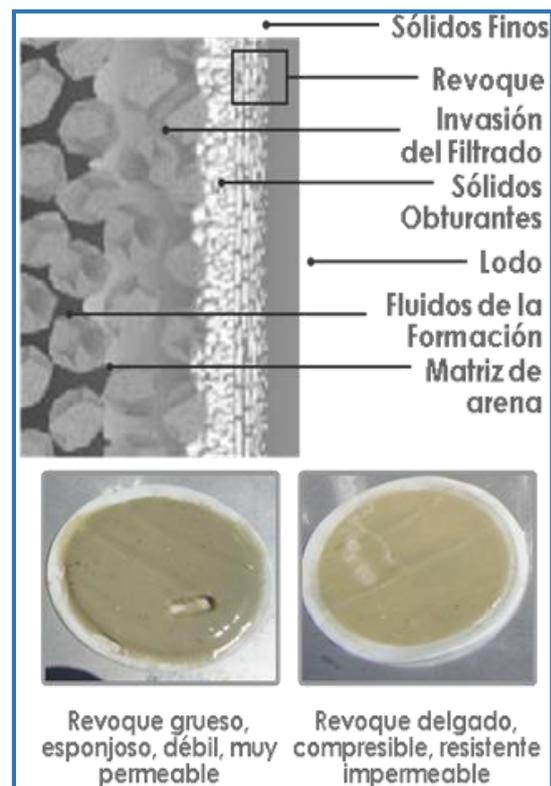
- Posee la capacidad del control filtrado y hacer una pared.
- Bajos volúmenes de filtrados denotan paredes más firmes e impermeables.
- Volumen de filtrado menor a 15 ml/seg son deseables.
- Una pared de filtración gruesa significa un alto contenido de sólidos y por lo tanto hay mayor filtración a la formación.
- Los fluidos de perforación deben estar diseñados para limitar la invasión del filtrado hacia la formación y depositar un revoque delgado y de baja permeabilidad.

*Según MI SWACO, comenta:*

“Cuando la presión hidrostática de la columna de lodo es mayor que la presión de la formación, el filtrado invade la formación y un revoque se deposita en la pared del pozo”.

- Los problemas relacionados con un revoque grueso y una filtración excesiva incluyen reducción de calibre, alto torque y arrastre; pegadura diferencial, etc.

**Figura N° 22:** Filtración y permeabilidad



**Fuente:** MI HHD Mining and Waterwell, Fluidos de Perforación, Rio de Janeiro - Brasil - 2010.

### Filtrado versus Pérdida de Circulación

- El filtrado se refiere a la fuga de solo la fase líquida del lodo hacia una formación permeable.
- Formaciones muy permeables con grandes gargantas de poros, permiten que el lodo entero invada la formación, resultando en una pérdida parcial o total de la circulación del fluido.

- Según el sistema de perforación que se use, varios aditivos, pueden ser aplicados para controlar el filtrado hacia la formación:
  - Las arcillas comerciales. (Bentonitas)
  - Polímeros naturales.
  - Polímeros sintéticos.
- En el caso de pérdida de circulación o retorno existen diversos LCM que pueden emplearse:
  - Polímeros hinchables.
  - Materiales granulares fibrosos o escamas.

#### **g. RHEOLOGÍA:**

“Nos permite determinar la capacidad de acarreo y suspensión de un fluido. Rheología indica de donde viene la viscosidad”.

Es la ciencia, que estudia la deformación y flujo de la materia.

Analiza la relación entre esfuerzos de corte / velocidad de corte y el impacto que estos tienen sobre las características de flujo. La manera que este flujo crea y utiliza las presiones dentro de materiales tubulares y espacios anulares.

Dentro de los principales modelos rheologicos tenemos:

- Fluidos Newtonianos.
- Fluidos No Newtonianos.

Al mismo tiempo la Rheologia indica viscosidad plástica y “yield point” del fluido. Se indican “porque” el fluido tiene su viscosidad de solido o de polímero.

**g.1. Viscosidad plástica:** Indica cuanto de la viscosidad por causa de la resistencia mecánica a fluir (solido insoluble). Es la parte de la resistencia al flujo, causada por fricción mecánica.

Está relacionada con la concentración de sólidos, tamaño y forma de ellos, presencia de polímeros, etc.

En la práctica un aumento de viscosidad plástica, puede significar un aumento de la concentración de sólidos. Altos valores de esta propiedad son inconvenientes.

Se mide con el Reómetro V-G, restando los esfuerzos de corte medidos a 600 menos el de 300 RPM

**g.2. Yield Point (Punto Cedente):** Indica cuanto de la viscosidad es por causa de la resistencia química a fluir. Es el segundo componente de la resistencia al flujo. Viene a ser una medida de las fuerzas electroquímicas y de atracción dentro del fluido. Es usado como un indicador confiable de la capacidad de limpieza y de suspensión del fluido. Puede ser manipulado con un tratamiento químico adecuado

**g.3. Medida de la Viscosidad Plástica y Yield Point:** La medición de Viscosidad Plástica (PV), Punto Cedente (YP) y Geles se efectúa con un reómetro V-G.

Paso 1. Arrancar el motor con el conmutador en alta velocidad, con la palanca de cambio de velocidad en la posición más baja.

Paso 2. Esperar que el cuadrante indique un valor constante y registrar la indicación obtenida a 600 RPM.

Paso 3. Ajustar el conmutador a la velocidad de 300 RPM. Esperar que el cuadrante indique valor constante y registrar el valor para 300 RPM.

### **Cálculos.**

$PV \text{ (centipoise)} = \text{Lectura } 600 - \text{Lectura } 300$

$YP \text{ (lb/100 ft}^2\text{)} = \text{Lectura } 300 - VP \text{ (centipoise)}$

#### **h. TRIXOTROPIA:**

“Es la propiedad que tienen las suspensiones bentoníticas de pasar de gel a sol mediante agitación. Ciertos geles pueden licuarse cuando se agitan vibran y solidifican de nuevo cuando cesa la agitación o la vibración”.

Las agitaciones o vibraciones, o incluso menores perturbaciones mecánicas hacen que una sustancia tixotrópica se vuelva más fluida, hasta el extremo de cambiar de estado, de sólida a líquida pudiendo recuperarse y solidificarse de nuevo cuando cesa la agitación o vibración.

*Según MI SWACO:*

“La tixotropía es la propiedad de los fluidos de formar una estructura de gel, cuando están estáticos, regresando al estado fluido cuando se ponen en movimiento”.

La resistencia del gel formado depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico. Está relacionada con la capacidad de suspensión del fluido. Los esfuerzos de gel excesivos pueden causar complicaciones.

Ciertas arcillas presentan propiedades tixotrópicas (p. ej., las suspensiones ‘0). Cuando las arcillas tixotrópicas se agitan, se convierten en un verdadero líquido, es decir, pasan de "gel" a "sol". Si a continuación se las deja en reposo, recuperan la cohesión y el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. En cambio, en torno a su límite plástico, no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

**h.1. Medida de la Viscosidad Plástica y Yield Point:** La medición de Geles se efectúa con un reómetro V-G.

Paso 1. Agitar la muestra a 600 RPM durante 15 segundos y cambiar de velocidad hasta la posición neutra.

Paso 2. Apagar el motor y esperar 10 segundos.

Paso 3. Con el conmutador en la posición de baja velocidad registrar el esfuerzo de gel inicial como el máximo observado. (lb/100 pies<sup>2</sup>)

Paso 4. Si el indicador del cuadrante no vuelve a ponerse a cero con el motor apagado, no se debe reposicionar el conmutador.

Paso 5. Repetir las etapas, para 10 minutos y registrar las unidades de deflexión máxima como esfuerzo de gel a 10 minutos.

Paso 6. Siempre indicar la temperatura medida.

#### **2.1.10.4. CARACTERISTICAS MEDIAS DE UN LODO DE PERFORACIÓN.**

- Densidad, 1,2 gr/cm<sup>3</sup>
- pH óptimo varía entre 7.5 a 9.
- Viscosidad Marsh (embudo calibrado) de 30 a 70 centipoises.
- La viscosidad del agua es de 26 segundos/qt.
- Perforación minería: Rango normal 32 hasta 50 seg/qt
- Perforación de pozos de agua rango normal 35 a 60 seg/qt.
- Gel en el minuto 0 a 10
- Gel en el minuto 10,1 a 50 (viscosímetro Stormer)
- Costra inferior a 6/32 de pulg. (5 mm)
- Contenido en arena inferior a 2 o 3%

#### **2.1.10.5. PROGRAMACION DE UN FLUIDO DE PERFORACION**

Para programar los fluidos para cada pozo, se requerirá de la siguiente información:

- Diámetro y profundidad del pozo
- Diámetro de las barras de perforación

- Geología esperada del terreno, incluyendo: pérdida de circulación, derrumbes, arcillas, etc.
- Razón de bombeo y capacidades de presión de la bomba.
- Las medidas de los estanques de superficie y el equipo disponible.
- Razón de penetración esperada durante la perforación.
- Calidad del agua de terreno (dureza, pH).

El programador de fluido deberá considerar:

- Si se requiere un sistema inhibidor.
- Si el agua de terreno presenta algún problema.
- Métodos para combatir pérdidas de circulación o derrumbes y en qué lugares son esperados.
- Si las formaciones contienen arcillas.
- Qué tipo de lubricación es necesaria.
- Las características rheológicas y la viscosidad del fluido.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. EL PROBLEMA**

##### **3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

Es necesario conocer la metodología del control y el manejo adecuado del factor hídrico en mina, en nuestro caso describiremos detalladamente el procedimiento de perforación, diseño, instalación y construcción de pozos de agua y piezómetros, para el desarrollo normal y responsable de las diversas actividades mineras.

##### **3.1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

###### **3.1.2.1. PROBLEMA PRINCIPAL.**

¿Cuáles son las consideraciones técnicas que influyen para la construcción de pozos de agua y piezómetros?

### **3.1.2.2. PROBLEMAS SECUNDARIOS.**

- ¿Cuáles son los principales parámetros de perforación que intervienen dentro de la construcción de pozos de agua y piezómetros?
- ¿Cuáles son los principales parámetros Hidrogeológicos que intervienen dentro de la construcción de pozos de agua y piezómetros?

### **3.1.3. OBJETIVOS**

#### **3.1.3.1. OBJETIVO GENERAL.**

Determinar los principales parámetros técnicos aplicados en la construcción de pozos de agua y piezómetros en la Minera Barrick Misquichilca SAC, Unidad Minera Pierina.

#### **3.1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Determinar los parámetros técnicos que influyen en el diseño óptimo de un pozo de agua y piezómetro.
- Identificar el método de perforación preferida para la instalación y construcción de pozos de agua y piezómetros, tomando en cuenta las condiciones geológicas de la mina Pierina.
- Describir las consideraciones técnicas que intervienen en la instalación y construcción de pozos de agua y piezómetros.

### **3.1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1.4.1. JUSTIFICACIÓN.**

El presente trabajo monográfico da a conocer al personal la manera de cómo llevar a cabo un buen trabajo, durante la perforación, diseño, instalación y construcción de pozos de agua y piezómetro, asimismo

promueve su conservación y duración para la recopilación de muestras de aguas subterráneas y una eficiente caracterización ambiental e hidrogeológica del emplazamiento.

Tiene una justificación por su aporte técnico científico a los conocimientos de los diferentes métodos de perforación, construcción e instalación de pozos de agua y piezómetros.

En la actualidad es importante el uso adecuado de los recursos hídricos, por tanto; es importante conocer su comportamiento y sus componentes para así tener una información detallada y real, durante la perforación se toman datos reales de la geología y la hidrología, para determinar un modelo hidrogeológico y su posterior instalación y construcción de pozos de agua y piezómetro.

#### **3.1.5. LIMITACIONES.**

En el presente trabajo de investigación se busca un enfoque particularmente en el procedimiento de construcción de pozo de agua y piezómetros, para tener un buen control y manejo adecuado del recurso hídrico. La bibliografía a utilizar se ve limitada a los procedimientos de la minera, boletines y revistas, ya que no es muy difundido en nuestro país. Las limitaciones económicas también se muestran en este caso ya que para la construcción de pozos de agua y piezómetro es necesario tener una inversión considerable.

### **3.2. HIPÓTESIS**

#### **3.2.1. HIPÓTESIS GENERAL.**

Aplicando adecuadamente las consideraciones técnicas influirán en la construcción de pozos de agua y piezómetros en la Minera Barrick Misquichilca SAC.

### **3.2.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA.**

- Determinar las consideraciones técnicas influyentes en la construcción de pozos de agua y piezómetros.
- La Identificación de los parámetros hidrogeológicos, influirán en la construcción de pozos de agua y piezómetros.

### **3.3. VARIABLES.**

#### **3.3.1. VARIABLE INDEPENDIENTE.**

Consideraciones técnicas.

#### **3.3.2. VARIABLE DEPENDIENTE.**

Construcción de pozos de agua y piezómetros.

### **3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.**

#### **3.4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.**

Los métodos de investigación empleada para esta monografía serán Descriptivo, explicativo y analítico.

#### **3.4.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.**

##### **3.4.2.1. POBLACIÓN.**

La población estará constituida por la construcción de 7 piezómetros y un pozo de agua.

#### **3.4.2.2. MUESTRA.**

Se tomaron datos aleatorios de las perforaciones para determinar los parámetros que nos conllevaran a un mejor análisis para la producción del agua y la instalación, monitoreo de los 7 piezómetros y un pozo de agua.

#### **3.4.3. TÉCNICAS, INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE DATOS.**

##### **3.4.3.1. TÉCNICAS.**

Las técnicas de análisis se determinan considerando los criterios de la perforación rotativa y rotoperkusiva, para la construcción de los pozos de agua e instalación y monitoreo de los piezómetros.

##### **3.4.3.2. INSTRUMENTOS.**

La empresa dispone del procedimiento de perforación, diseño, instalación y construcción de pozos de agua y piezómetros.

#### **3.4.4. FORMA DE TRATAMIENTO DE LOS DATOS**

Se irá procesando la información de las fuentes primarias y secundarias teniendo el criterio del tipo de investigación planteada que en nuestro caso es de tipo cualitativo.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **4.1. PROCEDIMIENTO DE PERFORACIÓN, DISEÑO, INSTALACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE AGUA Y PIEZOMETROS**

##### **4.1.1. PREPARACIÓN DE LA PLATAFORMA DE PERFORACIÓN, TRASLADO E INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE PERFORACIÓN:**

Toda plataforma de perforación se preparara cumpliendo los requisitos mínimos de una operación segura que son:

- Área suficiente para la instalación y permanencia de todos los equipos y materiales de perforación, equipos auxiliares de éste, zona para aditivos y materiales a utilizarse en la perforación y construcción del pozo de monitoreo.
- Contar con poza de Sedimentación de detritos, producidos por la misma perforación. Siempre que sea necesario; el volumen mínimo será de 3m (anchura) x 5m (largura) x 1m (profundidad); usar geo-textil para provocar infiltración y atrapar sedimento fino; donde el terreno es

poco espacioso la cantidad de pozas depende del caudal que se encuentre en cada perforación y la capacidad de infiltración del terreno.

- Bermas de seguridad de altura de  $\frac{3}{4}$  de la altura de las llantas en el vehículo de transporte ó equipo pesado más grande.
- Señales preventivas, informativas, restrictivas y mandatorias.

El traslado e instalación de los equipos de perforación se realizará en el lugar escogido de acuerdo con las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio y las exigencias del Área de Geotecnia. Cumpliéndose con las políticas de Seguridad y Medio Ambiente.

#### 4.1.2. PUNTOS DE PERFORACIÓN

**Tabla N° 09.** Puntos de perforación

PUNTOS DE PERFORACIÓN (PSAD56)				
CÓDIGO	ESTE	NORTE	COTA	PROFUNDIDAD (m)
HW-01-14	216380.055	8954589.93	3900.23	250
HW-02-14	215859.55	8955418.3	3966.556	250
HW-05-14	216657.655	8955174.04	3830.919	94
HW-03-14	216150.744	8954405.1	4018.759	100
HW-04-14	216262.182	8954178.3	4031.382	120
HW-07-14	216169.94	8954004.82	4114.573	100
HW-06-14	216956.604	8954642.4	3989.449	100

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.1.2.1. Relación entre del Diámetro del Taladro y Diámetro del pozo de Agua y/o Piezómetro**

Tomar en cuenta que el diámetro de la broca de perforación debe ser conforme con el diámetro del tubo del piezómetro a ser instalado y el requisito de espacio anular de dos pulgadas.

El diámetro del taladro debe ser suficiente para dejar un espacio anular de dos pulgadas (2") entre del tubo del piezómetro y la pared del taladro. Por ejemplo, si el tubo seleccionado del piezómetro tiene un diámetro exterior de 2.5", el diámetro del taladro debe ser de seis pulgadas (6.5"). Este espacio anular de 2" debe ser lo mismo hasta el fondo del sondaje (taladro).

En el caso del uso de tubo de 1.5" de diámetro externo, el diámetro mínimo del taladro debe ser de 5.5".

El diámetro de la broca de perforación debe guardar relación con el diámetro del tubo del piezómetro y el requisito de espacio anular de dos pulgadas.

#### **4.1.2.2. Verticalidad y Alineamiento del Taladro**

El Perforista debe tomar en cuenta que la instalación de piezómetros requiere más que un taladro en el terreno. El taladro debe ser estable, sin derrumbes y recto, es decir, sin una desviación excesiva de una línea recta.

Para la instalación del tubo sólido (casing) y/o la tubería ranurada (screen) no es necesario tener un taladro perfectamente vertical, sin embargo es imperativo que el taladro esta recto.

La causa principal de que un taladro no esté recto o perpendicular es por el uso de la presión ó peso sobre la broca (WOB) excesiva y/o una tasa de perforación (ROP) demasiada alta.

La profundidad prevista en un piezómetro dependerá del su propósito y el programa de perforación, y de las condiciones hidrogeológicas del terreno. La longitud final puede ser menor ó más profunda de lo programado.

#### **4.1.2.3. Método de Perforación Optima**

Dado las condiciones geológicas en la mina Pierina, el método de perforación preferido es el de rotación con circulación invertida (RC). La perforadora SCHRAMM T130XD es la que se usara para realizar la instalación y construcción de piezómetros periodo 2014.

La Perforación de los primeros metros se desarrolla con la broca de mayor diámetro de perforación que ha de usarse durante toda campaña. Luego se estabiliza las paredes de este taladro con la ayuda de un casing y el relleno del espacio anular libre entre el taladro y el casing con bentonita granulada de 3/8".

##### **a. PERFORACIÓN CON MARTILLO DE FONDO:**

Se realiza esta perforación con brocas de botones esféricos y elípticos, el empuje (energía aire comprimido) del pistón se transfiere a través de la barra de perforación hasta el martillo que es acoplada a la broca produciendo de esta manera la percusión de la broca aproximadamente entre un rango de 0.2 – 0.15cm. Los componentes son:

- Broca de botones: diámetro 5 1/2", longitud: 0.2m
- Barra (martillo): Diámetro 4 1/2", longitud 1.0m
- Adaptador: longitud 0.2m
- Interchage: Diámetro 4 1/2", longitud 1.3m
- Adaptador: Longitud 0.2m
- Barra de perforación: Diámetro 4 1/2", longitud 6.0m.

Las brocas usadas permiten tener una alta velocidad de perforación sobre terreno duro y seco, el problema que se genera es cuando se tiene presencia de agua y terreno arcilloso debido a que esta combinación genera la obstrucción de los accesorios de perforación, al mismo tiempo un caudal mayor a 10gpm genera problemas con la perforación ya que el avance se reduce a 0m debido a que se comienza a percutar sobre agua. Otro problema emergente viene a ser la desestabilización de las paredes del taladro producto de la percusión, esto podría generar atrapamiento del martillo y barras de perforación.

Los elementos básicos vienen a ser la percusión, rotación de la broca y el ingreso del aire comprimido.

- Presión de avance: 1000PSI
- Presión de rotación: 600PSI
- Aire comprimido: 120PSI

#### **b. PERFORACIÓN CON TRICONO:**

La perforación con tricono tiene como fundamento la rotación generando ruptura por fricción entre el terreno y el tricono. La perforación es relativamente lenta sobre terreno de alta resistencia, es muy efectiva en terreno de baja resistencia ya que permite conservar o debilita levemente las paredes del taladro, tiene un comportamiento eficiente en una alta presencia de agua, mayor a 10gpm no tiene problemas de perforación debido a su principio de perforación que viene a ser la rotación de la misma.

Está compuesta por los siguientes accesorios:

- Tricono: diámetro 5 1/2", longitud: 0.2m
- Adaptador: longitud 0.2m
- Interchange: Diámetro 4 1/2", longitud 1.3m
- Adaptador: Longitud 0.2m
- Barra de perforación: Diámetro 4 1/2", longitud 6.0m.

Los elementos básicos vienen a ser: rotación, percusión de la broca y el ingreso del aire comprimido.

- Presión de avance: 600PSI
- Presión de rotación: 1000PSI
- Aire comprimido: 120PSI

**a.1. Identificación de Indicadores de cambio de martillo a tricono:**

- **El tipo de material que retorna por el ciclón:** Identificar la granulometría del material puesto para una granulometría homogénea se considera al terreno como compacto, para una granulometría variada se considera un terreno con presencia de discontinuidades (presencia de fallas, contactos, etc).

Para tener una base que sustente nuestra apreciación, se recomienda realizar muestreo sistemático cada 2.0m, captando el material retornado en un recipiente que pueda recoger una muestra aproximada de 40kg y continuar con el procedimiento de muestreo, al final de ello se obtiene una columna estratigráfica del taladro.

- **La presencia de agua:** Viene a ser un dato importante, puesto que este nos permite identificar o aproximar el nivel de agua y a definir el punto de cambio de método de perforación entre martillo de fondo y tricono.

Se recomienda realizar un muestreo del incremento de agua recuperada por el ciclón cada 2.0m, este seguimiento es de vital importancia ya que nos permite conocer el comportamiento de la presencia de aguas subterráneas a mayores profundidades, analizar el incremento o decremento del mismo.

De no recuperar granos por el ciclón verifica la coloración del agua ya que la perforación puede estar atravesando una zona arcillosa.

- **El uso de lodos de perforación.** Definir el tipo de terreno atravesado por la perforación en el momento indicado y la presencia o no de agua nos permite usar adecuadamente nuestros lodos de perforación y así incrementar la eficiencia de las perforaciones. Dentro de los principales lodos que se considera tenemos lodos estabilizadores, inhibidores de arcilla, diluyentes de arcilla, etc).

Por cada 1000 litros de referencia, se sugiere la siguiente dosificación:

Ph Control	: 250 a 260 gr
Bentonita	: 20 a 40 Kg
Asfalto	: 2 a 4 Kg
PAC	: 1 a 5 Kg ó 2 a 10 l
PHPA	: 1 a 2 Kg ó 2 a 5 l
Surfactante	: 1 a 2 Kg ó 2 a 5 l

Esta dosificación es variable según las condiciones geológicas del terreno a perforar.

#### **4.1.3. INSTALACIÓN DE LOS TUBOS DEL PIEZÓMETRO**

##### **4.1.3.1. INSTALACIÓN DE LA COLUMNA DE TUBERÍA PVC O METÁLICA**

Terminada la perforación se procede a desinstalar todos los accesorios de perforación. El intervalo de tiempo entre la desinstalación de los accesorios de perforación y la instalación de la tubería de PVC o metálica con su respectivo sensor debe de ser el menor posible, debido a que los esfuerzos horizontales del terreno generarán la desestabilización de las paredes del taladro y por consiguiente producir derrumbes y reducir de esta manera la profundidad planificada y ejecutada del taladro.

#### **4.1.3.2. SE PROCEDE CON LA INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE PVC DE DIÁMETRO 2" Y LONGITUD 5.00m:**

El primer tubo de PVC debe de tener ranuras horizontales no mayor a 5mm para permitir el ingreso del agua y evitar el ingreso de arena silicea (filtro) al mismo tiempo llevar un tapón en la parte inferior de tubo de PVC en forma de cono, este ultimo debe permanecer a uno 0.5m sobre el fondo del taladro. Es posible colocar una cantidad mayor de tuberías ranuradas hasta alcanzar el nivel de agua, depende básicamente del diseño preliminar. Los 0.5m de espacio dejado entre el fondo del taladro y la columna de PVC o metálica son rellenos con arena silicea, la función de la arena silicea en los 0.5m es amortiguar la columna de PVC y así evitar flexión de la tubería al momento de instalar toda la columna.

#### **4.1.3.3. INSTALACIÓN DE COLUMNA DE TUBERÍA TRIMIN PIPE O TUBERÍA TROMPA**

La columna de tubería trompa se instala a una profundidad menor aproximadamente a 10.0m respecto al sensor instalado en la columna de PVC, la tubería trompa tiene un diámetro de 1 7/8" y una longitud de 6.0m. La función de la columna de tubería trompa es de ingresar los materiales para la construcción del piezómetro entre los principales materiales de construcción que se ingresan por esta tubería son: arena silicea, bentonita granulada de diámetro 7/8" y la lechada de cemento.

#### **4.1.3.4. INSTALACIÓN DEL PAQUETE DE FILTRO**

El paquete de filtro (o filtro de grava) se utiliza como medio filtrante es instalado en el anillo (espacio anular) entre la tubería ranurada (la criba) y la pared del taladro. Luego del desarrollo, un piezómetro filtrado correctamente está relativamente libre de sedimentos y las muestras de agua tendrán una turbidez baja

. **Tabla N° 10:** Características recomendables del paquete de filtro basadas en los tamaños comunes de la ranura de la criba

<b>Tamaño de la Apertura de la Ranura mm (pulgada)</b>	<b>N° de ranura</b>	<b>Tamaño Efectivo de la Arena D-10, mm</b>	<b>Tamaño de la Malla</b>
0.25 (0.010)	10	0.4 a 0.5	20 a 40
0.50 (0.020)	20	1.0 a 1.2	10 a 20
0.75 (0.030)	30	1.0 a 1.2	10 a 20
<b>1.0 (0.040)</b>	<b>40</b>	<b>1.6 a 1.8</b>	<b>8 a 12</b>
1.5 (0.060)	60	2.3 a 2.8	6 a 9
2.0 (0.080)	80	2.4 a 3.0	4 a 8

a. **El procedimiento para la Instalación del Paquete de Filtro será el siguiente:**

- El tamaño de grano requerido dependerá en el tamaño de la abertura de la ranura seleccionada. En la mayoría de las instalaciones para MBM la arena será de 8 x 12 (D-10 de 1.6 – 1.8 mm).
- El relleno del espacio anular con la arena se debe de realizar con el uso de un tubo trompa descontaminado, de diámetro interior mínimo recomendado de 2.54 cm (1 pulgada). Se recomienda usar el de 1.5 pulgadas de diámetro interno, para facilitar las maniobras y evitar el atoro de la tubería.
- El paquete de filtro de arena se coloca a medida que se va retirando el tubo trompa para evitar el atoramiento de este, hasta una altura superior de 1.5 m de la parte superior de la tubería ranurada (criba).
- Durante el proceso colocar el paquete de filtro es recomendable inyectar agua limpia para asegurarse que la arena está ingresado al fondo y no forme puentes, luego se procederá a pesar la parte superior del filtro antes de iniciar el sello de bentonita.

- El procedimiento de instalación del paquete de filtro se realiza llevando al igual que el anterior proceso un control que se ha de plasmar en el reporte por turno, y deberá quedar registrado en el formato de construcción y diseño final del piezómetro, teniendo como referencia el manual de instalación de Barrick.

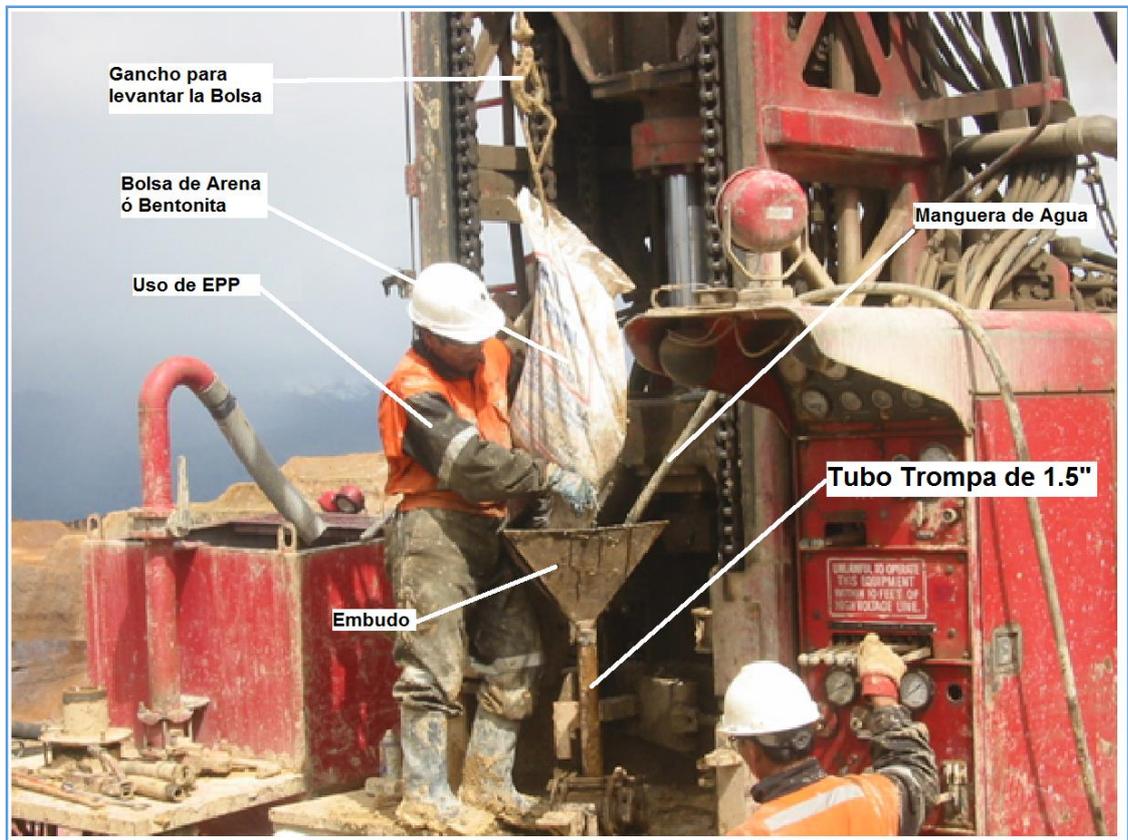
**b. Procedimiento para la Instalación del Sello de Bentonita encima del Paquete de Filtro**

- La bentonita debe tener una forma granular (3/8" de diámetro) para garantizar un buen sellado; el sello debe realizarse de la siguiente manera.
- Se instalara usando el tubo trompa hasta la parte superior del paquete del filtro (véase la Figura 6.6.1)
- El tubo trompa debe de ser elevado lentamente a medida que se va llenando el espacio anular, con el fin de obtener el espesor requerido el tubo trompa dará la referencia de la altura de la bentonita.
- Si el nivel de agua es alto en el piezómetro, es conveniente sumergir la bentonita granulada en aceite vegetal antes de su ingreso, de esa manera se retardará su reacción con el agua, permitiendo instalarla a la profundidad deseada.
- Luego de culminado el bajado de la bentonita se debe agregar agua para hidratar este sello, dejando un tiempo prudencial para que los granos gruesos de bentonita se hidraten y que el sello de lodo se expanda antes de enlechar la columna restante.
- Es necesario asegurarse que la bentonita se haya instalado en el lugar correcto, para ello se debe medir con el peso (Tagline) antes de iniciar

el sello con lechada de cemento. De no contar con el espesor deseado de bentonita será necesario rellenar hasta tener el nivel deseado.

- El procedimiento de instalación del sello de bentonita se realiza llevando al igual que el anterior proceso un control que se ha de plasmar en el reporte por turno, y deberá quedar registrado en el formato de construcción y diseño final del piezómetro, teniendo como referencia el manual de instalación de Barrick.

**Figura N° 23:** Uso del Tubo Trompa en la Colocación de Arena y Bentonita



**Fuente:** elaboración propia

**c. Procedimiento para la Instalación del Sello de Cemento al 2% de Bentonita con Bomba de Lodos**

- El sello de cemento se desarrolla desde la parte superior del sello de bentonita hasta el collar del taladro, es decir, hasta la plataforma de perforación donde se empezó la perforación del pozo.
- Después de la mezcla inicial de cemento y agua, se puede agregar de 1% a 10% de polvo de bentonita, por peso seco de cemento
- El cemento debe ser uno de los cinco tipos de cemento Portland mencionados en la Especificación C 150 de la ASTM. Cada tipo de cemento tiene características diferentes que pueden ser apropiadas según las condiciones químicas o físicas en el pozo de sondeo. Sin embargo, el cemento más común usado para la instalación de piezómetros es el cemento Portland Tipo I.
- El uso de bentonita en la mezcla de cemento proporciona plasticidad a la lechada y retarda la contracción del cemento.
- Cuando se mezcla una lechada de base de cemento con bentonita, el cemento debe ser el primer componente añadido al agua.
- Se recomienda por la ATSM que la mezcla de cemento consista en de 23 a 25 litros (de 6 a 7 galones) de agua por 43 Kg. (94 libras) por saco de cemento Tipo I
- La bentonita debería ser agregada seca al lodo de cemento-agua sin haberse mezclado primero con agua.
- La utilización de aditivos al cemento de fraguado rápido (acelerantes) no es recomendable para instalar piezómetros debido a que los

aditivos en el cemento pueden ser extraídos por lixiviación y afectar la química del agua alrededor del taladro. También, la alta temperatura producida por los acelerantes puede dañar el PVC del piezómetro.

- No se debe utilizar lechada de cemento que está en proceso de fragua (apelmazada) con el fin de evitar acumulación (el puenteo) en la tubería trompa. Es decir, el tiempo entre mezclar la lechada y el bombeo del mismo debe ser menos que una hora.
  
- Se recomienda por la ASTM usar una mezcla de 2% de bentonita (por peso seco de cemento), lo cual es más común y tiene los materiales en el siguiente ratio:  
 60 galones de agua fresca | 426.4 kg de cemento | 8.53 kg de bentonita. Este es equivalente a: 60 gal. Agua | 10 sacos cemento | 1/3 saco bentonita de 22.7kg (50 lbs).

**Tabla N° 11:** Lechada de Cemento - Bentonita

<b>Bentonita por Peso de Cemento</b>			
<b>Material</b>	<b>2%</b>	<b>5%</b>	<b>10%</b>
Agua	60 galones	60 galones	60 galones
Cemento	10 sacos (427kg; 940lb)	10 sacos (427kg; 940 lb)	10 sacos (427kg; 940 lb)
Bentonita	1/3 saco de 50 lbs (8.53kg; 18.8lb)	01 saco (22.7kg; 50lb)	02 sacos (45.4kg; 100lb)

**Fuente:** MINA BARRICK MISQUICHILCA SAC, Perforación, Instalación, Construcción y Protección de Piezómetros de tubo abierto, 2013

#### **4.1.3.5. TIEMPO DE FRAGUADO**

El tiempo de espera para el fraguado del sello de cemento será entre 2 a 4 horas. Esto es considerando una mezcla base de cemento con 2% de bentonita (por peso seco de cemento), en lugar de una mezcla a base de bentonita. En el caso de base de bentonita será necesario esperar un tiempo más largo.

Se tomará una muestra de la mezcla de cemento-bentonita en un recipiente adecuada y dejarlo en la plataforma de perforación para que sirva como testigo y confirmar la condición del fraguado.

La razón esperar, es asegurar que la mezcla no debe sentarse más que un medio metro (0.5m) en el espacio anular. Por eso, no es necesario esperar más tiempo que lo absolutamente necesario. Si el asentamiento es más que 0.5m será necesario llenarlo nuevamente con una mezcla similar.

La instalación del sello superficial cerrará el espacio anular vacío como una tarea final de la instalación del piezómetro.

#### **4.1.3.6. INSTALACIÓN DEL SELLO SUPERFICIAL Y LA LOZA DE CEMENTO**

Para evitar la entrada de aguas superficiales en el piezómetro es necesario instalar un sello de cemento en la parte superior del taladro en los últimos metros a la superficie del terreno. El agua superficial puede infiltrarse en el suelo cerca del piezómetro, entrar en el taladro del piezómetro ó pozo y causar una lectura de nivel de agua subterránea falso en el piezómetro. También, el agua superficial puede ser contaminante del agua subterránea.

- El sellado de cemento en superficie es necesario para:
  - Fijar el casing superficial y proteger la tubería de PVC del piezómetro
  - Prevenir la entrada de agua de las escorrentías

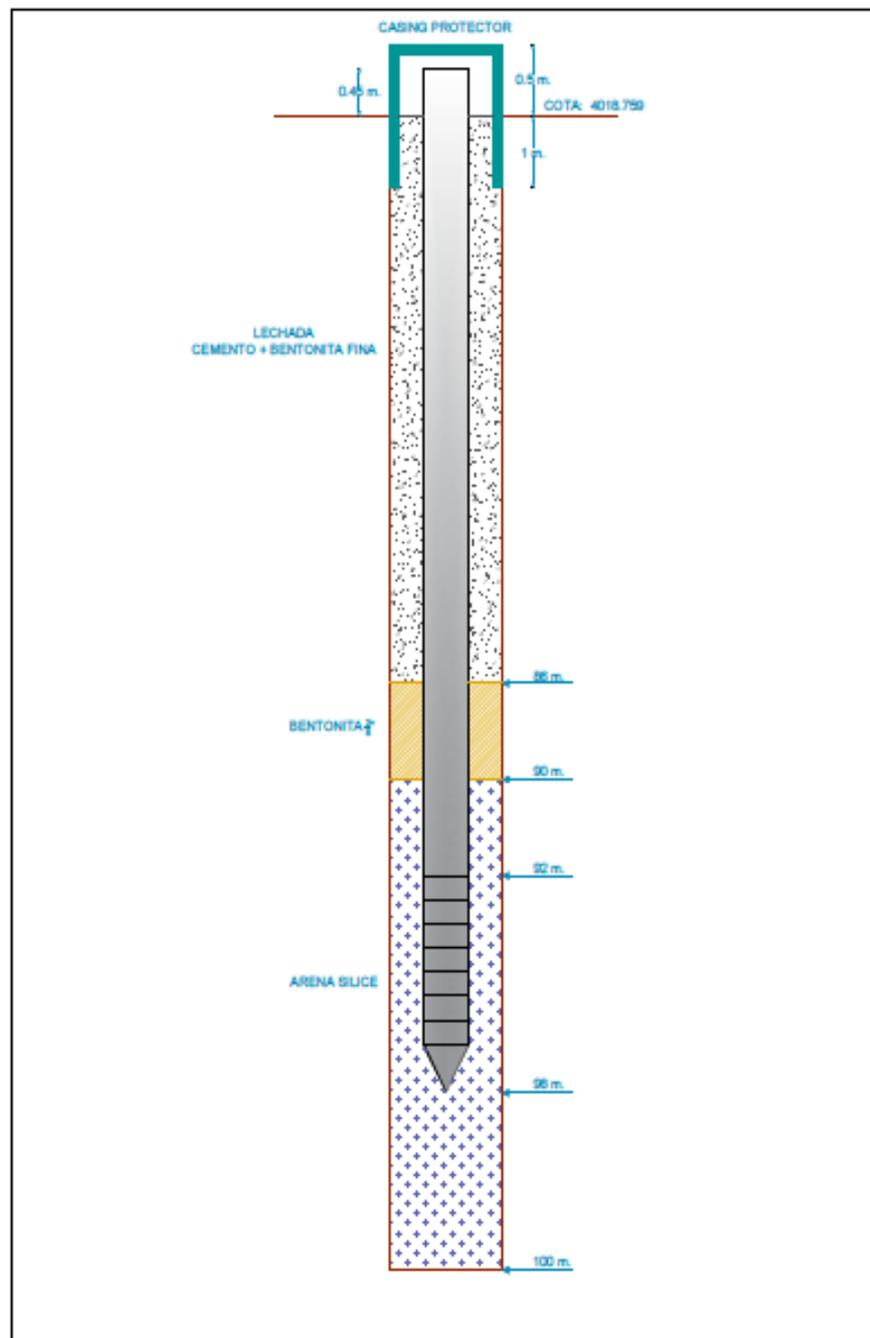
- Prevenir un nivel de agua subterránea falso en el piezómetro
  - Prevenir la contaminación del agua subterránea por el agua superficial.
- El sello tiene que ser de suficiente altura o espesor para prevenir la acumulación de agua de lluvia y empozamiento alrededor el piezómetro.
  - Por eso, es necesario construir una losa de cemento alrededor los tubos del piezómetro para formar un área elevada en relación al terreno cercano.
  - La losa de cemento debe ser de un espesor mínimo de 4 pulgadas y de un área de un metro cuadrado.

**Figura N° 24:** Instalación del sello superficial con la construcción de la Losa de Cemento y la Instalación de los Tubos de Protección



Fuente: Elaboración Propia

**Figura N° 25:** Diseño del llenado de Materiales de Construcción



**Fuente:** Elaboración Propia

#### **4.1.4. CONSTRUCCION DE POZOS DE AGUA**

##### **4.1.4.1. PERFORACIÓN DEL POZO PILOTO $\Phi$ 7”.**

Es toda aquella perforación vertical que se realiza con fines de cuantificar caudales de agua a diversas profundidades respecto a un punto superficial de referencia

Conforme se va perforando el pozo piloto; se van evaluando las variaciones de caudales y se va muestreando el tipo de material recuperado por el ciclón:

##### **4.1.4.2. MEDICIÓN DE LOS CAUDALES SISTEMÁTICAMENTE CADA 3 METROS:**

La realización de esta prueba resulta fundamental durante la perforación del pozo piloto ya que el terreno en su estado inicial nos brinda información de primera mano. El caudal de agua a ser bombeado o recuperado por el ciclón queda definido por los parámetros hidrogeológicos, estructuras geológicas y la presión de aire comprimido inyectado por la perforadora. La prueba de caudal debe de ejecutarse cada 2.0m perforados, usando para esta prueba: probetas, jarras, baldes o cilindros graduados debidamente.

**Tabla N° 12:** Prueba de Caudal del pozo piloto de agua

Profundidad (m)	Caudal GPM	Profundidad (m)	Caudal GPM	Profundidad (m)	Caudal GPM
66	68.6	114	189.1	162	243.5
69	91.5	117	173.8	165	281.0
72	90.1	120	184.6	168	263.9
75	90.5	123	193.8	171	276.0
78	97.9	126	202.0	174	284.0
81	106.6	129	203.9	177	286.5
84	103.9	132	230.8	180	283.9
87	115.0	135	236.0	183	292.6
90	120.9	138	229.8	186	260.5
93	130.2	141	253.1	189	252.3
96	130.1	144	262.0	192	294.0
99	143.1	147	265.0	195	267.8
102	154.9	150	273.0	198	278.9
105	160.1	153	271.0	201	278.2
108	186.3	156	293.8	204	283.2
111	171.9	159	298.1	207	285.6

**Fuente:** Elaboración Propia

- a. Muestreo del tipo de material perforado:** El muestreo del material recuperado por el ciclón es un indicador de valiosa importancia debido a que los datos obtenidos nos permiten determinar nuestra mezcla óptima de lodos de perforación, definir presencia de estructuras geológicas, predecir el comportamiento del caudal recuperado por el ciclón.

El muestreo consta básicamente en identificar la variación de la granulometría del material recuperado, mineralización, presencia de

oxidación, tipo de material. Se realiza en paralelo con las pruebas de caudal con fines de obtener la columna estratigráfica del pozo piloto.

**b. Aplicación de lodos de perforación:** La aplicación óptima de lodos se realiza cuando se define el tipo de terreno, la presencia de estructuras geológicas y la presencia de agua.

Para un terreno arcilloso con dominio de alteración argílica y de Cuarzo alunita; con presencia de una falla estructural dominante a una profundidad de 185m, para todas estas condiciones descritas se requiere una aplicación adecuada de lodos específicos, una preparación promedio de lodos se encuentra en la siguiente dosificación:

Por cada 1000 litros de referencia, se sugiere la siguiente dosificación:

**Tabla N° 13:** Dosificación de lodos para la perforación

<b>ADITIVOS DE PERFORACIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>
Ph Control	250 gr
Bentonita	18 a 40 Kg
Asfalto	2 a 4 Kg
PAC	1 a 5 Kg ó 2 a 10 l
PHPA	1 a 2 Kg ó 2 a 5 l
Surfactante	1 a 2 Kg ó 2 a 5 l

**Fuente:** elaboración propia

La dosificación, adición o sustracción de los aditivos variarán de acuerdo a la condición geológica del terreno que estamos perforando y de acuerdo a las propiedades de cada aditivo.

El orden de adición de los aditivos de perforación es la siguiente:

1. pH control.
2. Bentonita.
3. Asfalto.
4. PAC.
5. PHPA.
6. Surfactante.

Los Controladores de Pérdidas de Circulación NO SE ADICIONAN DIRECTAMENTE al fluido que se ha de bombear, se agregan de manera muy independiente en un recipiente aparte (balde) para vaciar directamente a través del casing de construcción.

**c. Líneas de perforación del pozo de agua:** La perforación de un pozo de agua se inicia con un sondaje piloto, el cual determina finalmente la capacidad de almacenamiento del acuífero, mediante la recuperación del caudal de agua por el ciclón de la perforadora.

EL uso de las líneas de perforación consiste en el rimado progresivo del pozo hasta llegar al diámetro solicitado, generalmente el rango de incremento del diámetro del pozo no excede en 5 pulgadas, puesto que para un mayor diámetro se verán afectado el rendimiento de la broca, la velocidad de perforación y el uso a gran escala de lodos de perforación.

Los diámetros para los cambios de líneas son:

- Φ 7"
- Φ 9 1/2"
- Φ 13 1/2"
- Φ 15"
- Φ 18"

**d. Perforación con Casing Solido  $\Phi$  18”:** La perforación con casing se realiza debido a las condiciones litológicas y estructurales del terreno, terrenos altamente fracturados, presencia de panizo, etc; otra aplicación es la de mantener la orientación tanto en rumbo como en buzamiento de la perforación, evitando de esta forma la desviación del pozo, debido a que la resistencia a la flexión del casing solido instalado es mayor al de la tubería de perforación.

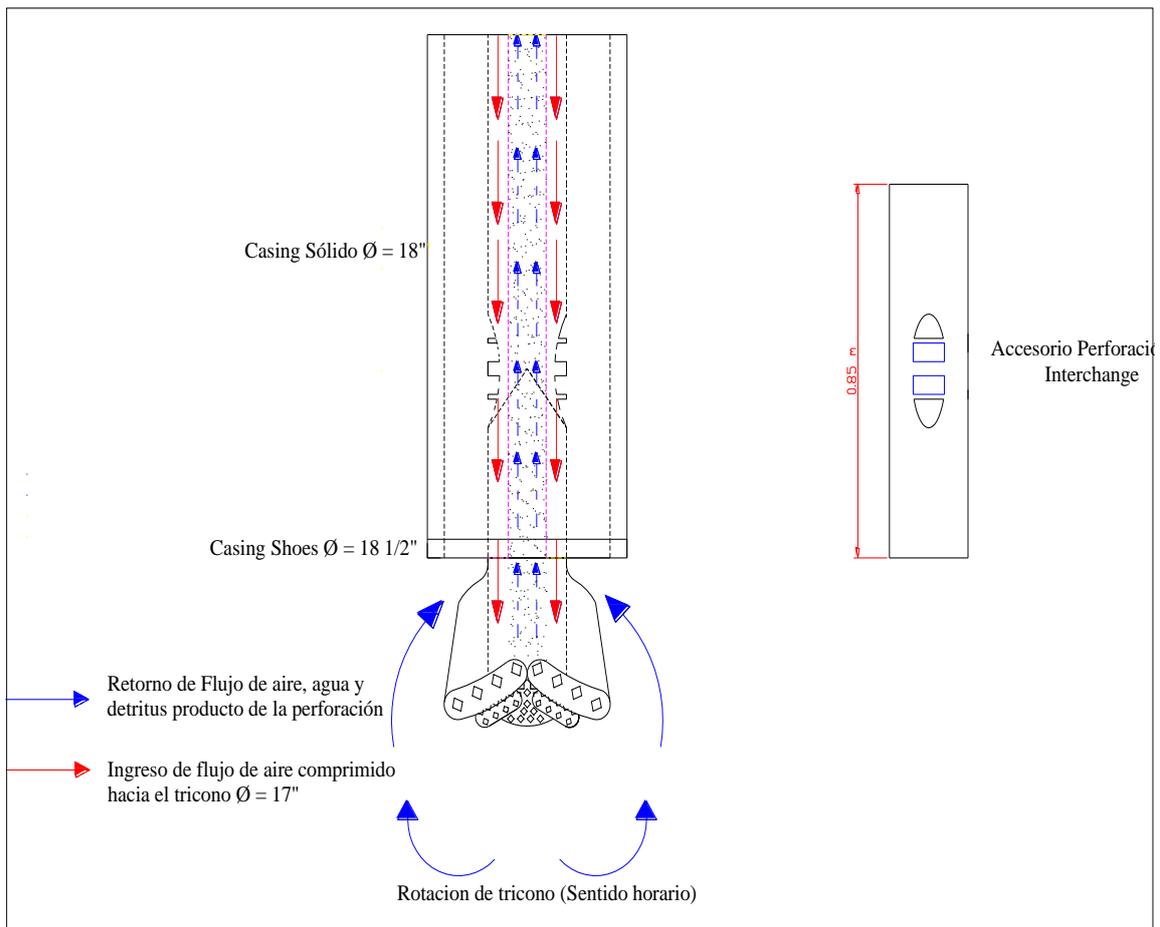
El proceso de perforación con casing consiste en mantener una distancia mínima respecto al martillo de perforación o tricono, esta distancia mínima puede variar hasta los 50.0cm, perforando de esta manera en paralelo con el martillo o tricono, la perforación con casing consiste en el incremento de diámetro del pozo comúnmente denominado Rimado.

**Funciones:**

Evitar problemas de entrapamiento de tuberías, reperforación del terreno, debido a que conforme se va profundizando el pozo, el casing continua realizando el rimado y sellado del pozo en paralelo con la perforación, evitando que de esta forma tramos altamente fracturados, panizados, presencia de tramos arenosos, arcillas puedan desprenderse y generarnos los problemas antes mencionados, de esta forma el pozo queda sellado por el casing durante todo el proceso de la perforación.

Mantener la orientación solicita tanto en rumbo como en buzamiento debido a la alta resistencia a la flexión que presenta el casing solido con respecto a las tuberías de perforación.

**Figura N° 26:** Perforación usando casing para realizar el rimado



Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.4.3. INSTALACIÓN DEL POZO DE AGUA

##### a. Instalación del casing de Producción $\text{Ø} 12''$

Terminado el proceso de perforación del pozo, se continúa con la correspondiente desinstalación de todos los accesorios de perforación, se retira toda la columna de casing instalada y se deja listo el pozo para proceder con la instalación del casing de producción.

El diseño de la instalación de la columna del casing ranurado de producción corresponde hasta el inicio de recuperación del agua subterránea.

- **Casing Ranurado  $\Phi$  12”**: Por lo tanto la columna de casing ranurado  $\Phi$  12” instalada viene a ser la diferencia entre la longitud total del pozo, la profundidad a la que se encuentra el nivel de agua y el 1.0m de grava redondeada  $\Phi$  7/8” que sirve como amortiguador de toda la columna de producción. Paralelo al casing ranurado se instala un piezómetro de tubo abierto  $\Phi$  2” con una columna de 5.0m de columna ranurada, todo ello con la finalidad de medir el nivel freático del pozo.
- **Casing Sólido  $\Phi$  12”**: La columna del casing solido  $\Phi$  12” se instala a continuación del casing ranurado, esta columna se instala para todo el tramo desde el nivel de agua hasta la superficie.

#### **b. Instalación del Piezómetro de tubo abierto**

Como se comento durante la instalación del casing ranurado, se instala hasta el fondo del pozo un piezómetro de tubo abierto con las mismas características de instalación de piezómetros descritos anteriormente.

#### **c. Ingreso de materiales de Construcción**

El orden de ingreso de materiales es el siguiente:

- **Grava Redondeada de  $\Phi$  7/8”**:

Cuyas características básicas son actuar de filtro facilitando el ingreso de las aguas subterráneas y limitando el ingreso de partículas (arenillas) evitando daños a la bomba sumergible.

La columna de grava es de la misma longitud a levemente mayor que la columna de Casing Ranurado.

- **Arena Silicea:**

Columna: Luego de haberse llenado la grava se procede a llenar con arena silicea una columna aproximada de 2.0m.

Función: La arena sílicea es usado como medio filtrante de menor rendimiento respecto a la grava; este material asegura el ingreso de aguas subterráneas cuando el nivel freático aumente debido a las condiciones climáticas.

- **Bentonita Granulada.**

Columna: 1.0m, se ingresa con aceite, se prepara en una tina tratando de cubrir al máximo las paredes de cada grano de bentonita de esta forma al desplazarse por el interior de la tubería evitando la obstrucción de la tubería hasta ingresar en contacto con el agua. Por tal motivo es preciso conocer el nivel de agua ya que si se tiene la tubería trompa dentro del agua esto producirá la reacción inmediata de la bentonita granulada debido al incremento de su volumen original generando de esta forma la obstrucción de la tubería en este tramo.

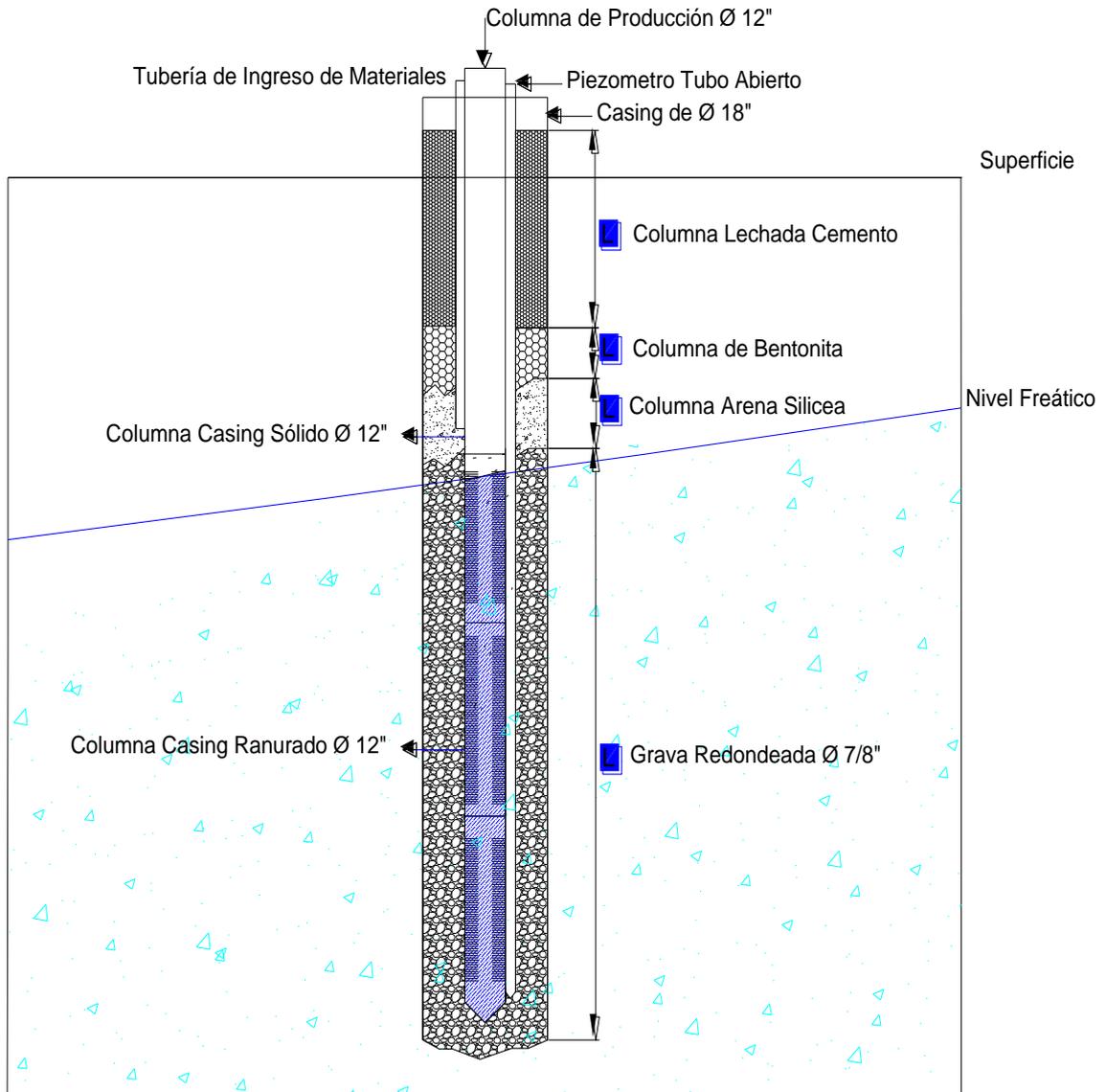
Función: Sirve de tapón y separador entre la columna de arena sílicea y la mezcla de cemento.

- **Lechada de Cemento (Grawting)**

Composición: Cemento, bentonita al 6% por peso de cemento y agua 6.5gal por cada bolsa de cemento.

Columna: Toda la columna libre desde la bentonita hasta superficie. La columna máxima a levantarse para un diámetro de 12" es de 50m, una columna mayor produciría deformaciones del casing, debido a la alta presión hidrostática y litostática.

**Figura N° 26:** Diseño final del pozo de agua



**Fuente:** Elaboración Propia

**d. Cálculo de materiales:**

**Tabla N° 14: Cálculo de Materiales**

Material	∅ Casing Prod. (m)	∅ Casing Const. (m)	Longitud pozo (m)	∅ Casing Prod. (m)	∅ Casing const. (m)	Área Anular (m <sup>2</sup> )	Volumen Rellenar (m <sup>3</sup> )	Volumen Bolsa (m <sup>3</sup> )
Grava	12	17	22.1	0.3	0.43	0.07	1.547	0.033
	12	18	139.6	0.3	0.46	0.09	12.564	
	12	20	39.3	0.3	0.51	0.13	5.109	
			201				19.22	
								582.42
Arena	12	20	2	0.3048	0.508	0.13	0.26	0.033
Silicea								7.9
Bentonita	12	20	1	0.3048	0.508	0.13	0.13	0.033
Granulada								3.9
Cemento	12	22	35.86	0.3048	0.5588	0.17	6.0962	0.033
	12	20	21.2	0.3048	0.508	0.13	2.756	
			57.06				8.8522	
								268.25

**Fuente:** Elaboración Propia

La cantidad de materiales calculados teóricamente realizando las diferencias entre los diámetros de perforación y construcción, para un pozo de 255.00m son:

- Grava de Canto Rodado calculado: 583 bls.
- Grava de Canto Rodado utilizado: 1130 bls.
- Arena Silicea calculado: 8.0bls.
- Arena Silicea utilizado: 12.0bls.
- Bentonita Granulada calculada: 4bls.
- Bentonita Granulada utilizada: 3.8bls
- Lechada de cemento calculada:
  - Cemento:269 bls
  - Bentonita en polvo (6% peso cemento): 32 bls

## 4.2. APORTE DEL TESISISTA

- Para medir la profundidad de rellenos de arena o bentonita en piezómetros, pozos o taladros, el uso de un cable dedicada a esta actividad es recomendable; un ejemplo es la marca Solinst, modelo “Tagline”, se suministra cables de acero inoxidable recubierto en polietileno permanente marcado e instalado en un carrete.
- El uso de un sondeo del nivel de agua no es recomendable dado que el peso no es suficiente sentir la altura de arena o bentonita.
- El sello de bentonita debe extenderse mínimo de 3.0 m. por encima del paquete del filtro con un máximo de 5.0 metros.
- No es recomendable usar aceite vegetal para retardar la hidratación de la bentonita para evitar que se expanda antes de llegar la profundidad requerida. El aceite tiene una tendencia migrar hacia la paquete de arena y afectará la calidad de agua de las muestras.
- Un sello de bentonita debe colocarse en el espacio anular entre el taladro y el tubo solido desde la parte superior del paquete de filtro hasta la superficie. Los materiales utilizados para cerrar el espacio anular pueden mezclarse con cemento ó como lodo de bentonita solo. También, utilizarse sin mezclarse, bajo la forma granular de granos gruesos preformados (pellets) de bentonita.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES**

- Se determinó los parámetros técnicos influyentes para la construcción de un pozo de agua y piezómetro, para lo cual es importante conocer; cada uno de los detalles de las perforadoras, así como también el monitoreo para realizar un procedimiento adecuado y un buen trabajo.
- Se identificó el método de perforación preferida que es el de rotación con circulación invertida (RC), para la instalación y construcción de piezómetros, tomando en cuenta las condiciones geológicas de la mina Pierina
- Se identificó los parámetros hidrogeológicos, influyentes en la construcción de pozos de agua y piezómetros, a través de los estudios de ingeniería para la ubicación de las cuencas y micro cuencas que son determinados a través de los estudios.

## **5.2. RECOMENDACIONES:**

- El uso continuo de lodos de perforación para la estabilidad de las paredes del taladro dependiendo de las condiciones litológicas y estructurales del terreno.
- Al tomar los datos para el caudal de agua es necesario estabilizar el flujo de agua, ya que la instalación del piezómetro depende de los datos de caudal de agua.
- Realizar un buen logueo geológico y la correcta toma de datos de caudal de agua siguiendo los procedimientos, ya que de estas consideraciones depende el diseño del piezómetro.
- Realizar el correcto control de las tuberías de perforación y el montaje respectivo para determinar la longitud final del taladro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. A.N. Strahler, The Earth Sciences, 2da Edición, 1971
2. Carlos y Emilio López Jimeno, “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”, Madrid, 2003
3. CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. (2001). Hidrología Subterránea. Segunda Edición. Ed. Omega. Barcelona.
4. Dr. Rolando Carrascal, Cartografía Hidrogeológica, Escuela Geológica FIGMM - UNI, Lima – Perú, 2008.
5. GEODATA, Especialistas en Instrumentación Geotécnica – Hidrológica.
6. Geotecnia Peruana SRL, Aditivos de Perforación, Dpto. de Operaciones, Lima – Perú, 2010.
7. Informes y manuales de Minera Barrick Misquichilca.
8. Juan J. Ordoñez Galvez, Aguas Subterráneas-Acuíferos SENAMHI, 1era Edición, Lima – Perú, 2011
9. Luis F. Rebollo, hidrogeología – Departamento de Geología – UAH – Universidad de Alcalá - 1987
10. MAIHESON, D.W.; BRUCE, R.L. y BEAUCHAMP, K.L., Diseños y análisis de investigación. México, - 1985, D.F.: Compañía Editorial Continental.
11. Máximo Villon, Fundamentos de Hidrología, 2da Edición, Lima – Perú, 2002;
12. MI HHD Mining and Waterwell, Fluidos de Perforación, Rio de Janeiro – Brasil – 2010.
13. Minera Barrick Misquichilca S.A.C., Perforación, Instalación, Construcción y Protección de Piezómetros de tubo Abierto, 2013.

# ANEXOS

**Figura N° 01:** Pozo perforado hasta el nivel de agua

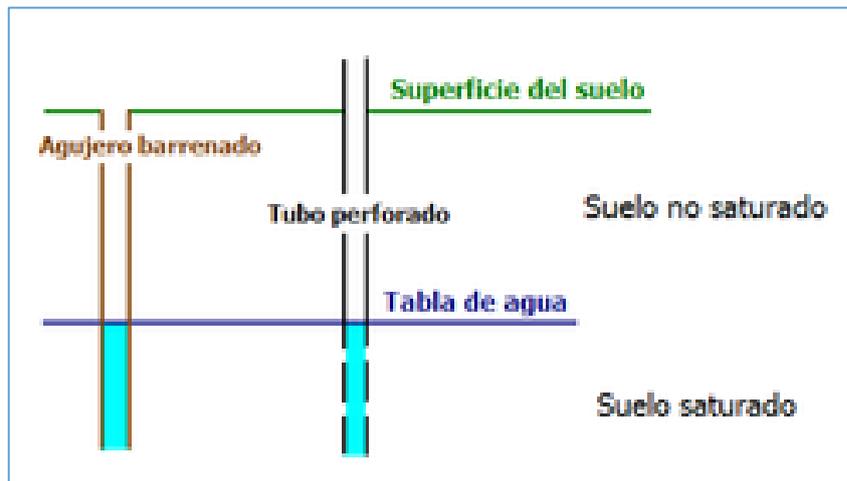
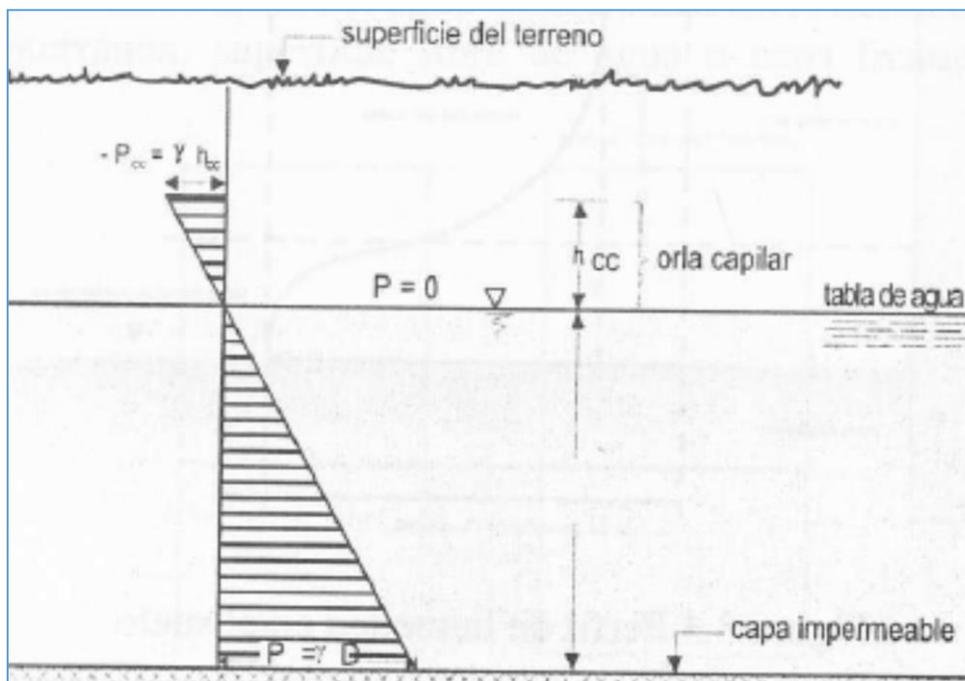
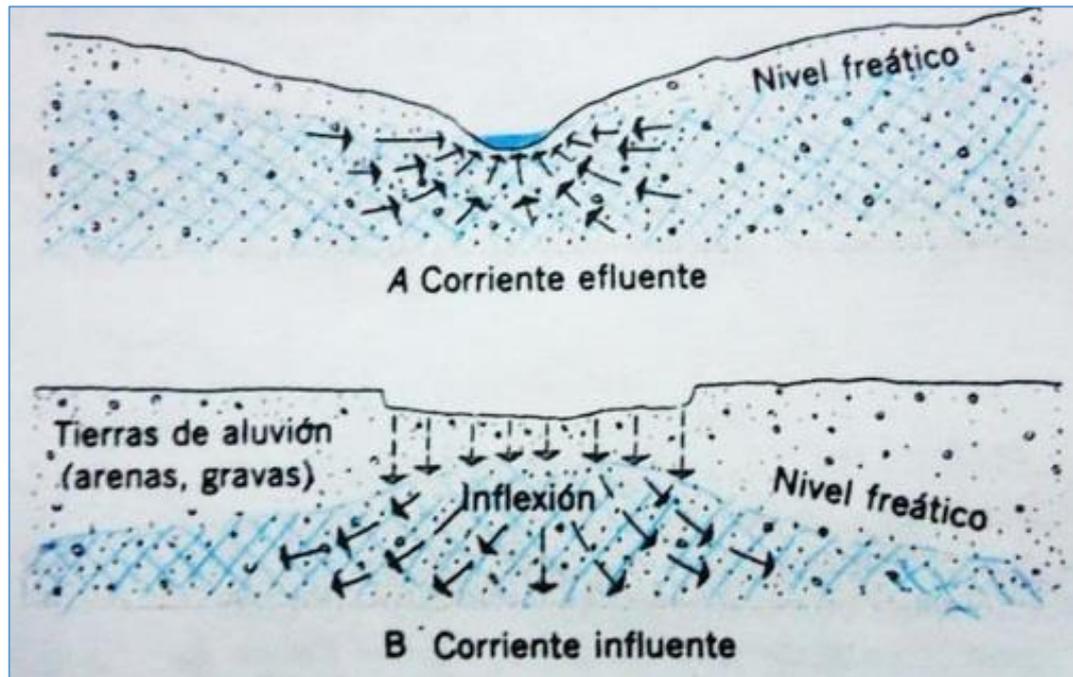


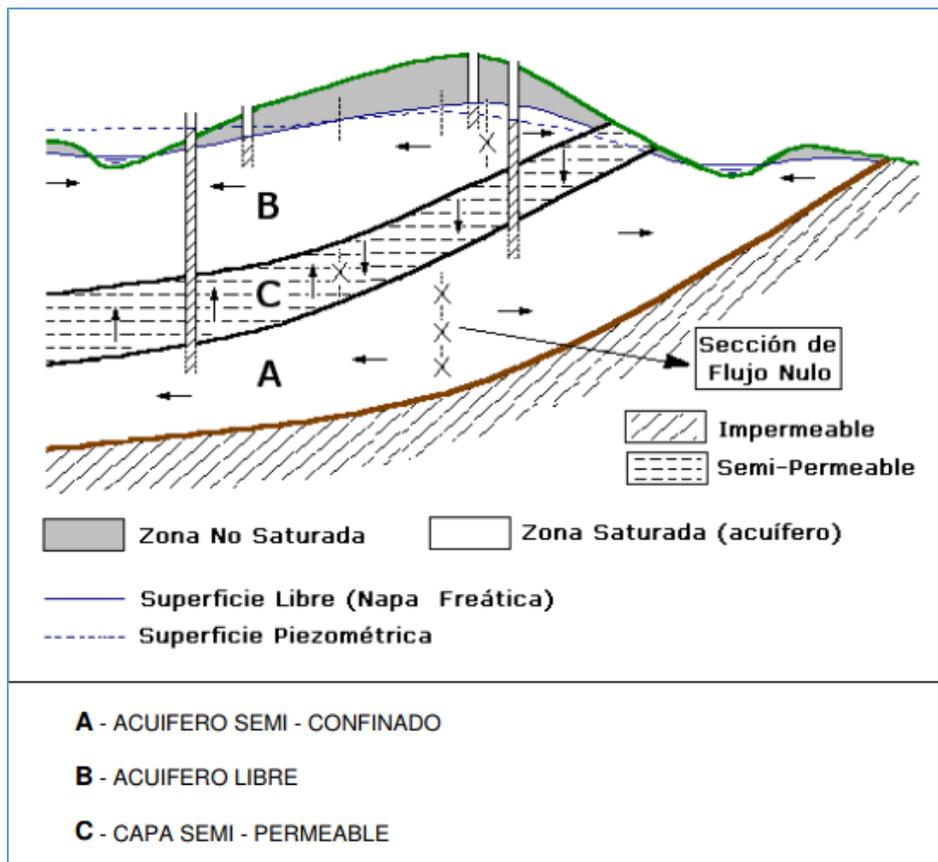
Figura N° 02: Diagrama de Presiones



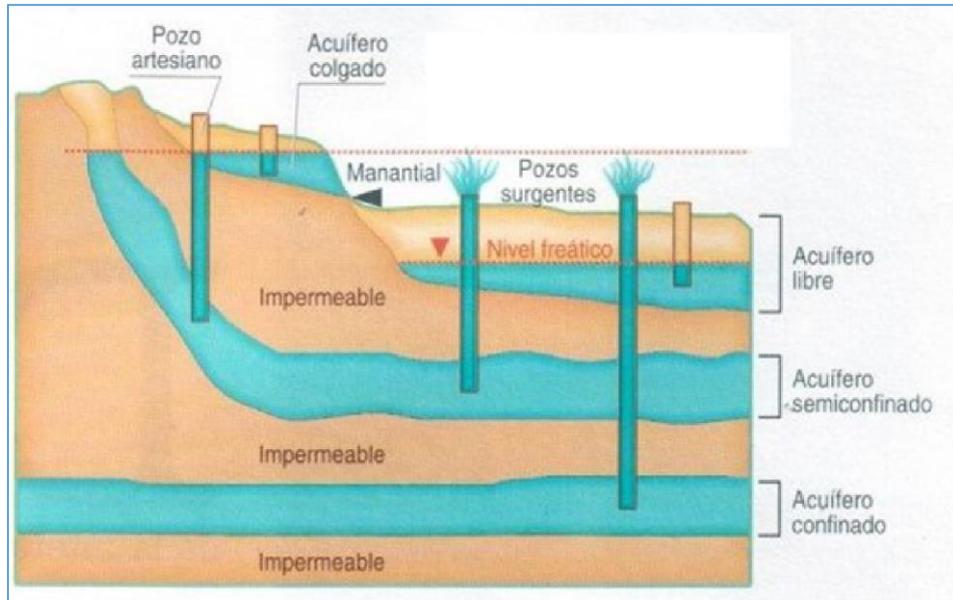
**Figura N° 03: Corriente influente y efluente**



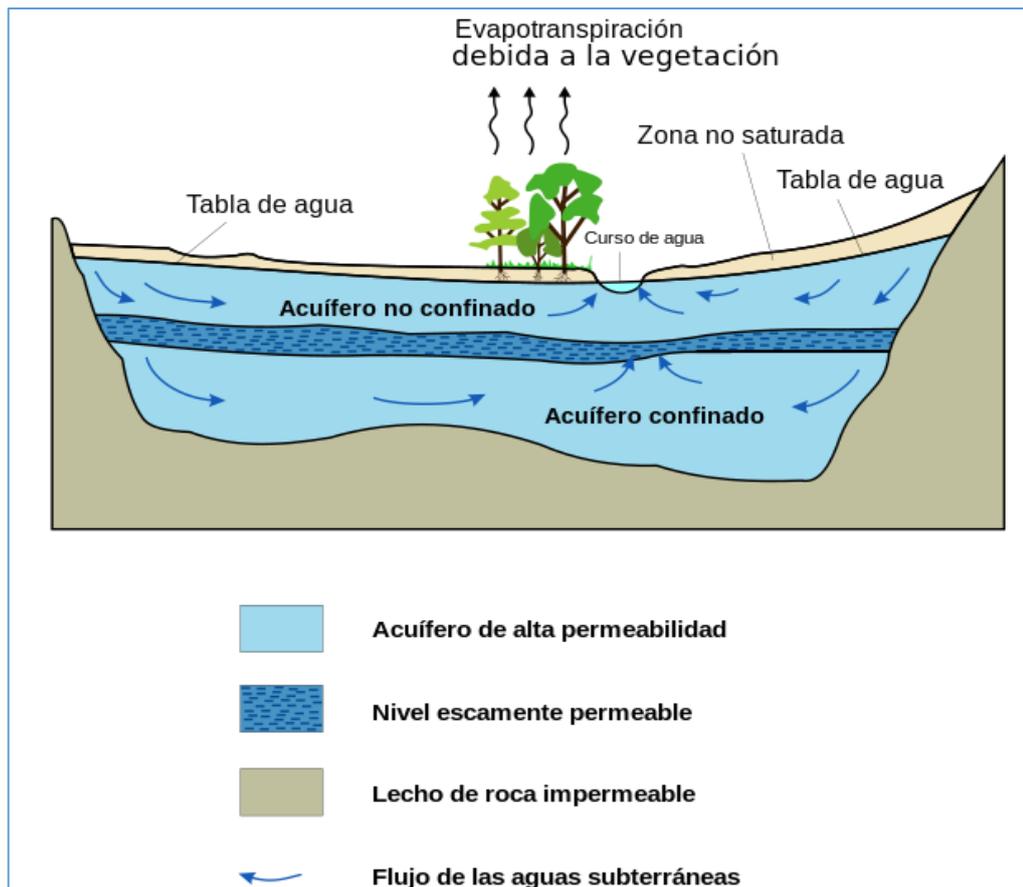
**Figura N° 04: Acuífero Libre**



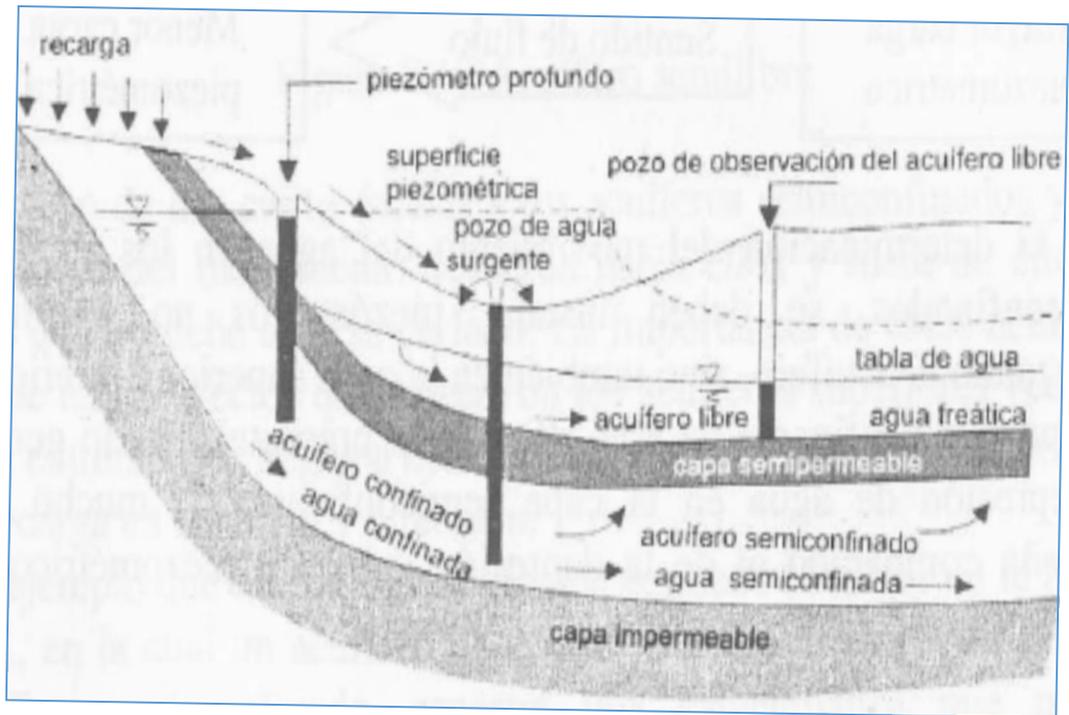
**Figura N° 05: Acuífero Confinado**



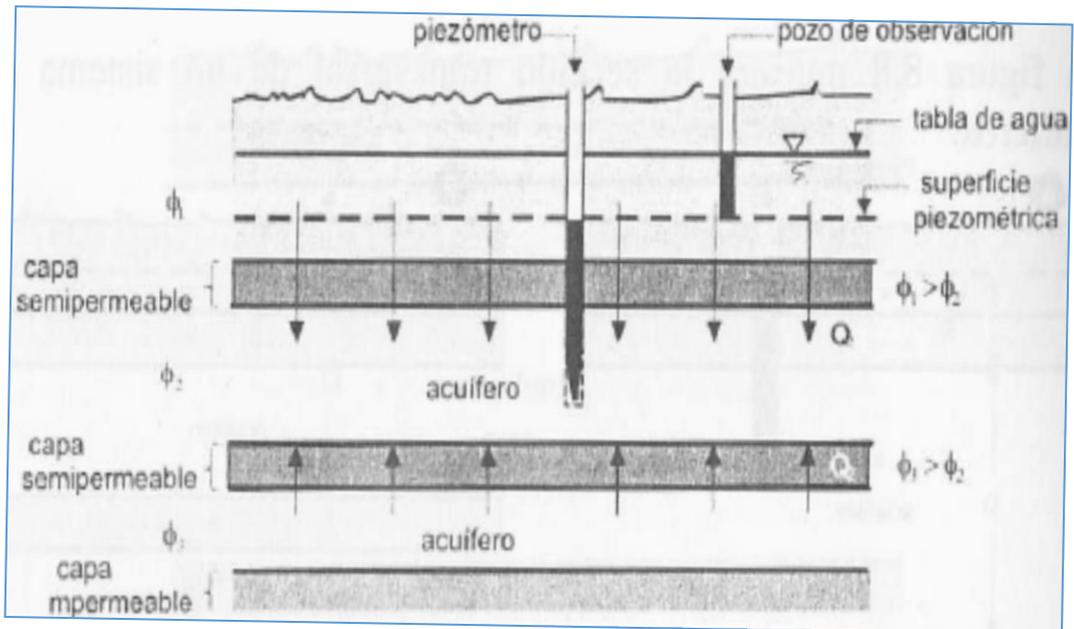
**Figura N° 06: Acuífero Confinado**



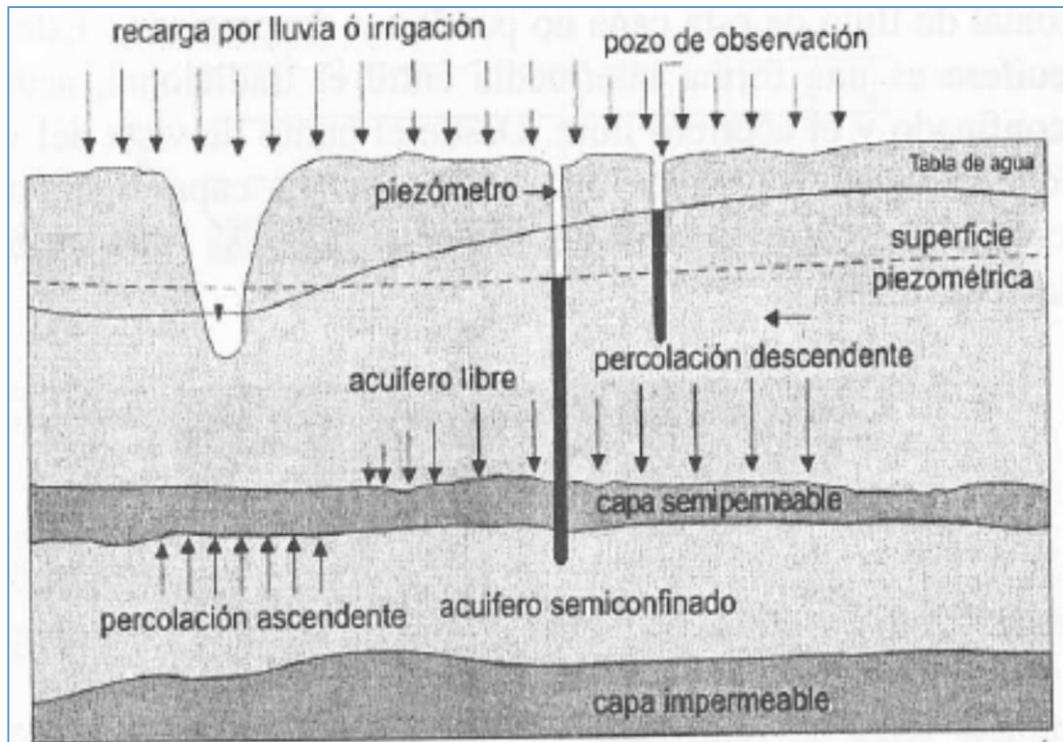
**Figura N° 07: Acuífero Semiconfinado**



**Figura N° 08: Esquema de flujo vertical Ac. Semiconfinante**



**Figura N° 09:** Efecto de la recarga y descarga vertical causada por un acuífero semiconfinado subyacente a uno libre



**Figura N°. 10:** Representación de un Acuífero

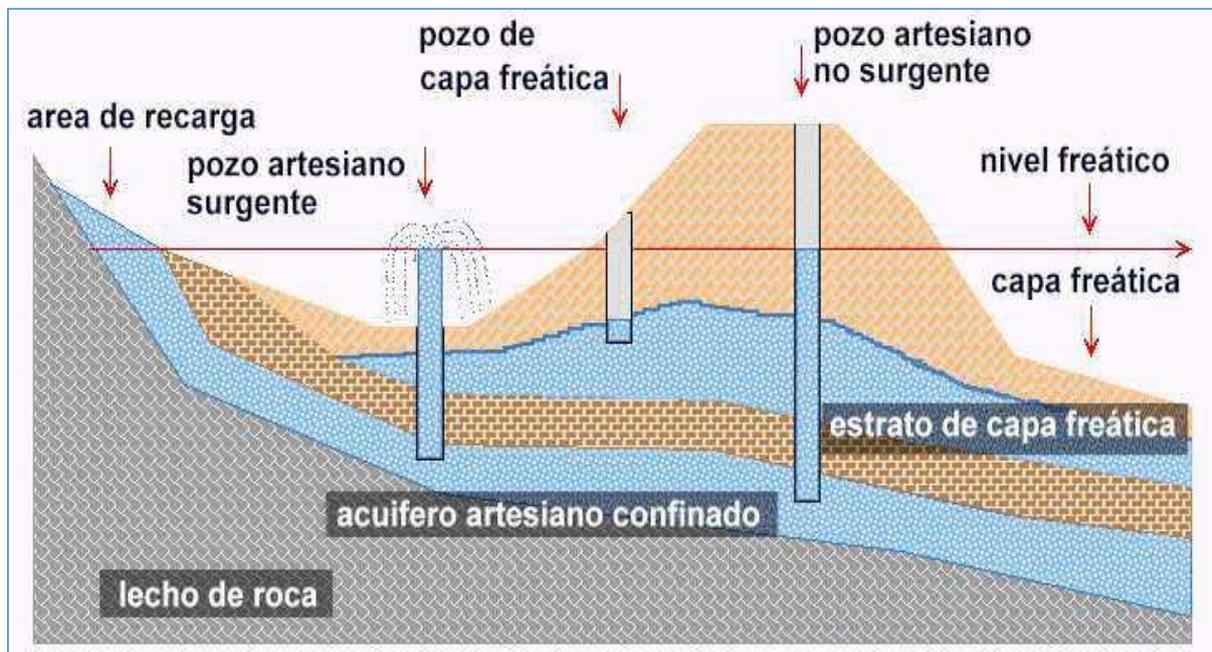


Figura N° 11: Zonas de un Acuífero

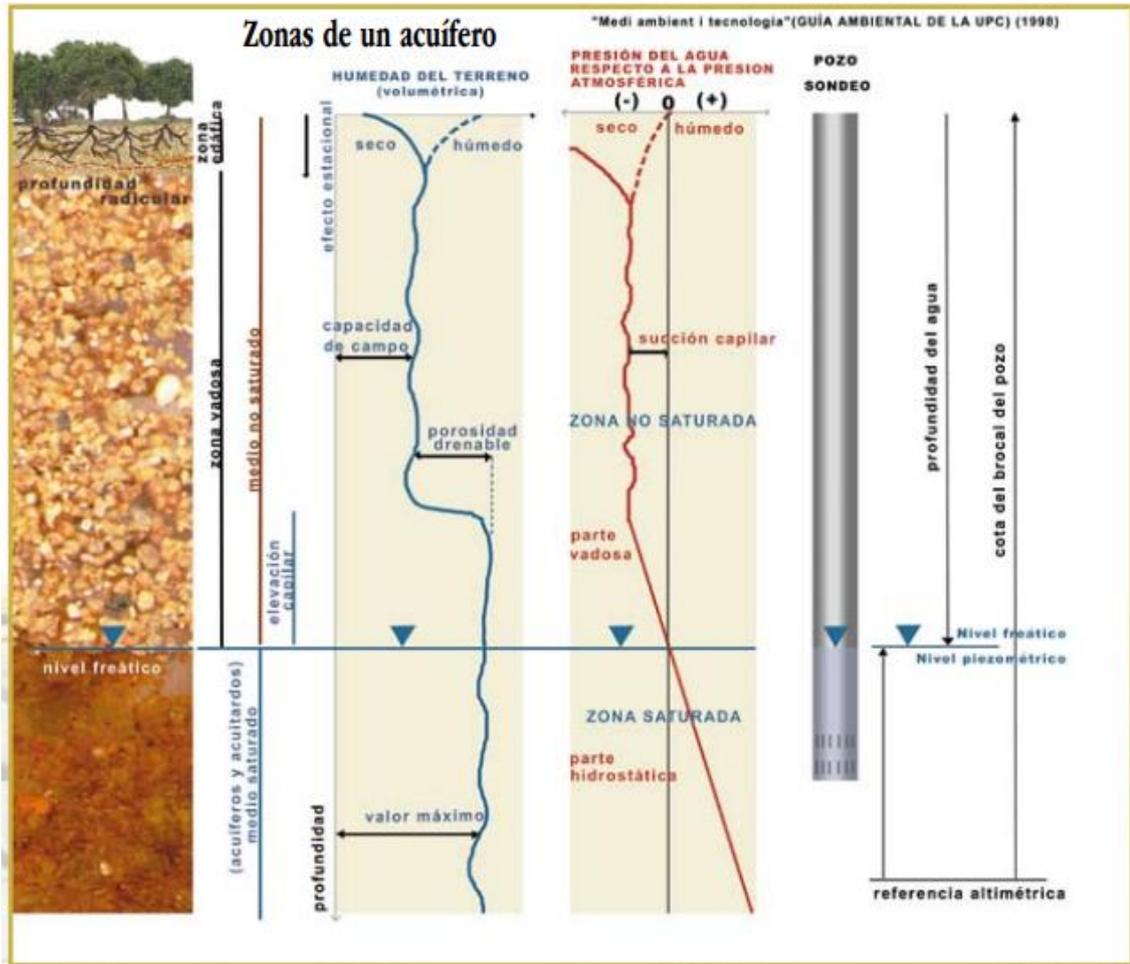
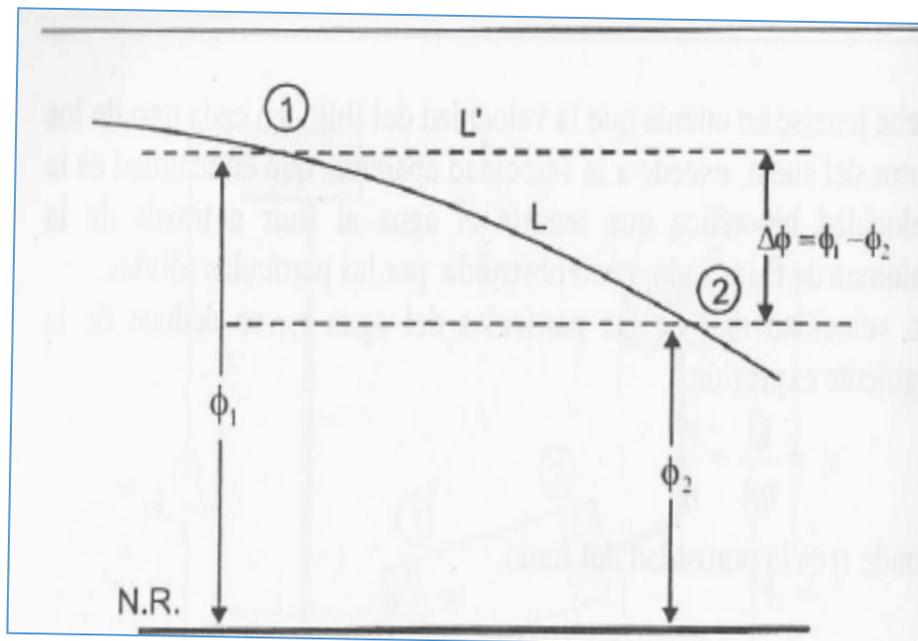
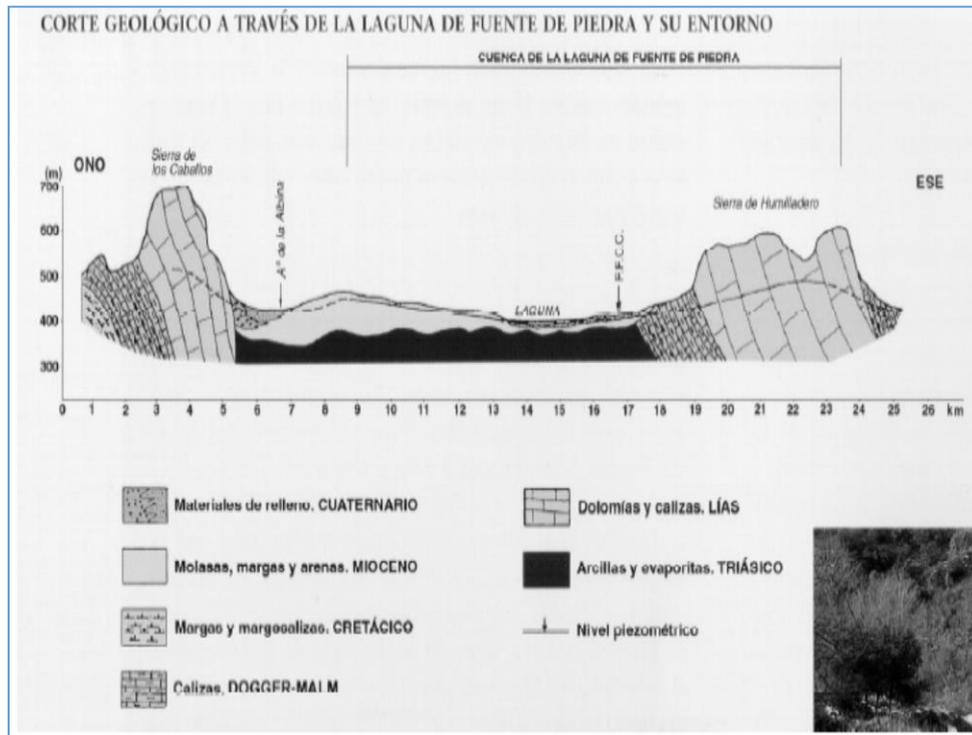


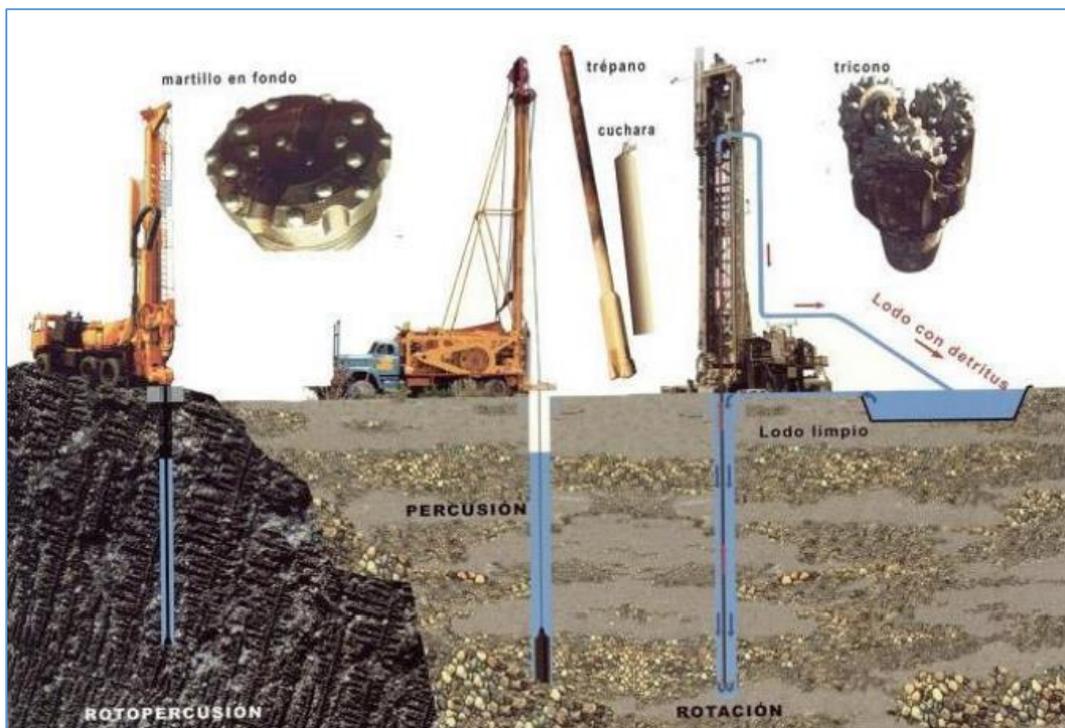
Figura N° 12: Gradiente Hidráulico



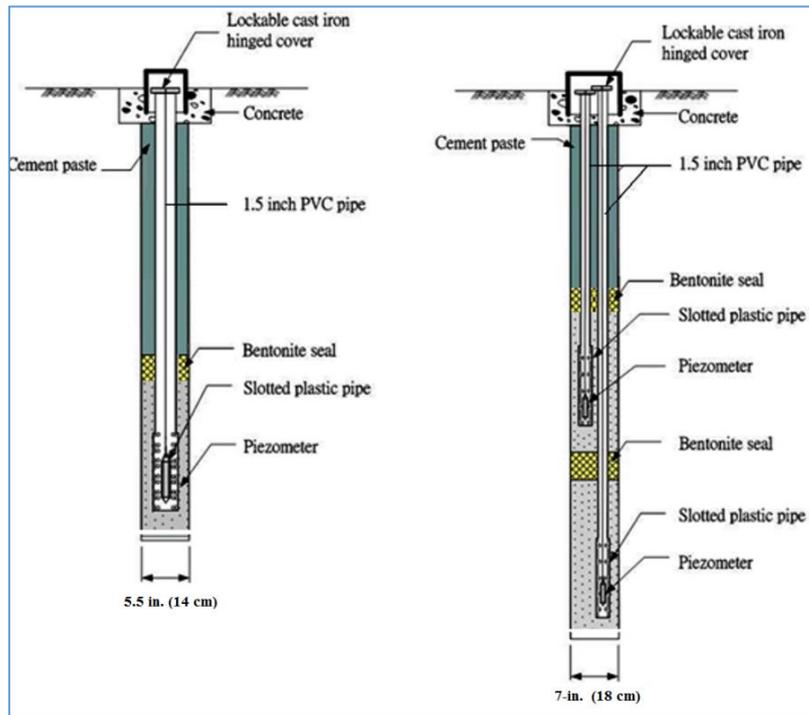
**Figura N° 13:** Distribución, presión y pérdida de carga en el flujo de agua a través de una columna de arena.



**Figura N° 14:** Métodos de perforación



**Figura N° 15:** Ejemplos de piezómetros simple y doble.



**Figura N° 16:** Kit de Medida de Arena



**Figura N°17:** Modelos Rheologicos.



**Figura N° 18:** Reómetro V-G.



**Tabla N° 01:** Intervalos de porosidad para materiales rocosos

Material	Porosidad (%)
Grava gruesa	28
Grava mediana	32
Grava fina	34
Arena gruesa	39
Arena mediana	39
Arena fina	43
Limo	46
Arenisca de grano fino	33
Arcilla	42
Arenisca de grano mediano	37
Caliza	30
Dolomita	26
Arena de duna	45

Material	Porosidad (%)
Loess	49
Suelo orgánico	92
Esquisto	38
Limolita	35
Lodolita	43
Lutita	6
Till -principalmente arena	31
Till - principalmente limo	34
Toba	41
Basalto	17
Gabro (meteorizada)	43
Granito (meteorizado)	45

**Tabla N° 02:** Intervalos de porosidad para materiales sedimentarios

Material	Porosidad (%)
Suelo	50 - 60
Arcilla	45 - 55
Limo	40 - 50
Arena uniforme	30 - 40
Grava	30 - 40
Grava y arena	20 - 35
Arenisca	10 - 20
Pizarra	1 - 10
Caliza	1 - 10

**Tabla N° 03:** Intervalos de porosidad específica para materiales.

Material	Producción específica (%)
Grava gruesa	23
Grava mediana	24
Grava fina	25
Arena gruesa	27
Arena mediana	28
Arena fina	23
Limo	8
Arcilla	3
Arenisca de grano fino	21
Arenisca de grano grueso	27
Caliza	14
Arena de duna	38
Loess	18
Suelo orgánico	44
Esquisto	26
Limolita	12
Till - principalmente limo	6
Till - principalmente arena	16
Till principalmente grava	16
Toba	21