

# CAPÍTULO V. HIDROGEOLOGÍA

## ÍNDICE

---

<b>1. PRINCIPIOS BASICOS DE HIDROGEOLOGIA .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. CICLO HIDROLÓGICO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. DEFINICIÓN, OCURRENCIA Y ORIGEN DEL AGUA SUBTERRÁNEA. ....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. ACUÍFEROS.....</b>	<b>3</b>
1.3.1. <i>Tipos de Acuífero</i> .....	3
1.3.2. <i>Propiedades Físicas</i> .....	4
1.3.2.1. Intersticios.....	4
1.3.2.2. Textura de los Sedimentos .....	5
1.3.2.3. Porosidad (m).....	6
1.3.2.4. Coeficiente de Almacenamiento (S) .....	6
1.3.2.5. Porosidad Eficaz (S') .....	7
1.3.2.6. Conductividad Hidráulica (K).....	7
1.3.2.7. Transmisividad (T).....	8
1.3.2.8. Resistividad Hidráulica (c) .....	8
1.3.2.9. Factor de Filtración (B).....	8
1.3.2.10. Anisotropía y Heterogeneidad .....	8
<b>1.4. MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....</b>	<b>9</b>
1.4.1. <i>Ley de Darcy</i> .....	10
1.4.2. <i>Velocidad Real</i> .....	11
1.4.3. <i>Hipótesis de Dupuit-Forchheimer</i> .....	11
<b>1.5. HIDRÁULICA DE POZOS.....</b>	<b>11</b>
1.5.1. <i>Régimen Estacionario</i> .....	12
1.5.1.1. Acuífero Confinado.....	12
1.5.1.2. Acuífero Libre.....	14
1.5.1.3. Acuífero Semiconfinado.....	15
1.5.2. <i>Régimen Transitorio</i> .....	16
1.5.2.1. Acuífero Confinado.....	16
1.5.2.2. Acuífero Semiconfinado.....	17
1.5.2.3. Acuífero Libre.....	18
1.5.3. <i>Pozo de Bombeo</i> .....	22

1.5.3.1. Origen del Descenso.....	22
1.5.3.2. Análisis del Descenso en los Pozos.....	22
1.5.3.3. Eficiencia.....	23
<b>1.6. RESERVAS Y RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA.....</b>	<b>24</b>
1.6.1. <i>Caudal Seguro</i> .....	25
1.6.2. <i>Balance Hídrico</i> .....	26
<b>1.7. RELACIONES AGUA DULCE – AGUA SALADA .....</b>	<b>27</b>
1.7.1. <i>Formación de Conos de Agua Salada</i> .....	29
<b>2. EXPLORACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA .....</b>	<b>31</b>
<b>2.1. MÉTODOS GEOLÓGICOS.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2. ESTUDIOS CLIMATOLÓGICOS.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3. MÉTODOS HIDROLÓGICOS.....</b>	<b>34</b>
<b>2.4. MÉTODOS HIDROQUÍMICOS .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5. INVENTARIO HIDROGEOLÓGICO .....</b>	<b>36</b>
2.5.1. <i>Recopilación y Análisis de Antecedentes</i> .....	36
2.5.2. <i>Censo de Pozos y Perforaciones</i> .....	37
<b>2.6. MÉTODOS GEOFÍSICOS .....</b>	<b>38</b>
2.6.1. <i>Métodos de Superficie</i> .....	40
2.6.1.1. Resistividad Eléctrica .....	40
2.6.1.2. Sísmica de Refracción .....	44
2.6.2. <i>Registros en Perforaciones</i> .....	47
<b>2.7. PERFORACIONES DE ESTUDIO .....</b>	<b>51</b>
2.7.1. <i>Métodos de Perforación</i> .....	52
2.7.2. <i>Controles y Ensayos Durante la Perforación</i> .....	54
<b>2.8. ENSAYOS DE BOMBEO .....</b>	<b>55</b>
2.8.1. <i>Estudios Preliminares</i> .....	56
2.8.2. <i>Elección del Lugar del Ensayo</i> .....	57
2.8.3. <i>Características del Pozo de Bombeo</i> .....	57
2.8.4. <i>Piezómetros</i> .....	59
2.8.4.1. Número de Piezómetros .....	59
2.8.4.2. Distancia de los Piezómetros.....	59
2.8.4.3. Profundidad de los Piezómetros.....	60
2.8.5. <i>Ejecución de los Ensayos de Bombeo</i> .....	61
2.8.5.1. Mediciones.....	62
2.8.5.2. Duración del Ensayo de Acuífero .....	64
2.8.6. <i>Interpretación de los Ensayos de Bombeo</i> .....	64
2.8.6.1. Método Logarítmico .....	65
2.8.6.2. Método Semilogarítmico o de Jacob .....	66
2.8.6.3. Método de Recuperación de Theis .....	67
<b>2.9. SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA.....</b>	<b>68</b>
2.9.1. <i>Método de Trabajo</i> .....	68
2.9.2. <i>Resultados Obtenidos</i> .....	69
2.9.2.1. Geomorfología.....	69
2.9.2.2. Climatología.....	69

2.9.2.3. Aguas Superficiales.....	69
2.9.2.4. Geología y Comportamiento Hidrogeológico.....	69
2.9.2.5. Perforaciones de Estudio.....	70
2.9.2.6. Prospección Geofísica .....	70
2.9.2.7. Aguas Subterráneas .....	70
<b>2.10. PARTICULARIDADES DE DIFERENTES AMBIENTES GEOLÓGICOS .....</b>	<b>71</b>
2.10.1. <i>Materiales no Consolidados</i> .....	71
2.10.2. <i>Rocas Ígneas y Metamórficas</i> .....	72
2.10.3. <i>Rocas Volcánicas</i> .....	73
<b>2.11. MODELOS DE ACUÍFERO .....</b>	<b>74</b>
2.11.1. <i>Modelos Matemáticos</i> .....	76
2.11.1.1. <i>Modelo Visual Modflow</i> .....	79
<b>3. CAPTACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA.....</b>	<b>83</b>
<b>3.1. CAPTACIONES HORIZONTALES.....</b>	<b>83</b>
<b>3.2. POZOS RADIALES.....</b>	<b>86</b>
<b>3.3. POZOS VERTICALES .....</b>	<b>89</b>
3.3.1. <i>Profundidad</i> .....	89
3.3.2. <i>Método de Perforación</i> .....	89
3.3.3. <i>Entubado</i> .....	90
3.3.4. <i>Diámetro</i> .....	92
3.3.5. <i>Filtro</i> .....	92
3.3.6. <i>Prefiltro de Grava</i> .....	94
3.3.7. <i>Cementación</i> .....	95
3.3.8. <i>Desarrollo</i> .....	95
<b>3.4. PROTECCIÓN SANITARIA.....</b>	<b>97</b>
<b>3.5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA .....</b>	<b>99</b>
3.5.1. <i>Control de Captaciones y Acuíferos</i> .....	99
3.5.1.1. <i>Control de Acuíferos</i> .....	99
3.5.1.2. <i>Control de Captaciones</i> .....	99
3.5.2. <i>Régimen Óptimo de Explotación</i> .....	100
3.5.2.1. <i>Funcionamiento de los Pozos de Producción</i> .....	100
3.5.2.2. <i>Conservación de los Recursos Hídricos Subterráneos</i> .....	100
3.5.3. <i>Rehabilitación de Perforaciones</i> .....	101
<b>4. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS.....</b>	<b>102</b>
<b>4.1. DEFINICIÓN Y OBJETIVOS DE LA RECARGA ARTIFICIAL.....</b>	<b>102</b>
<b>4.2. MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL .....</b>	<b>103</b>
4.2.1. <i>Sistemas de Recarga en Superficie</i> .....	104
4.2.2. <i>Sistemas de Recarga en Profundidad</i> .....	105
4.2.3. <i>Sistemas Mixtos de Recarga</i> .....	105
<b>4.3. OTROS ASPECTOS DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS .....</b>	<b>105</b>
<b>5. ÁREAS DE PROTECCIÓN .....</b>	<b>107</b>
<b>5.1. ALGUNOS ASPECTOS DE HIDROGEOLOGÍA Y DE CONTAMINANTES.....</b>	<b>108</b>
5.1.1. <i>Hidrogeología</i> .....	108

5.1.2. Contaminantes .....	108
<b>5.2. CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE ÁREAS DE PROTECCIÓN .....</b>	<b>111</b>
5.2.1. Distancia .....	112
5.2.2. Depresión .....	112
5.2.3. Tiempo de Tránsito.....	113
5.2.4. Límites de Flujo.....	113
5.2.5. Capacidad de Asimilación .....	114
5.2.6. Ejemplos de Valores Límites .....	114
<b>5.3. MÉTODOS DE DISEÑO.....</b>	<b>114</b>
5.3.1. Radio Fijo Arbitrario .....	115
5.3.2. Radio Fijo Calculado .....	116
5.3.3. Formas Variables Simplificadas.....	116
5.3.4. Métodos Analíticos.....	117
5.3.5. Relevamiento Hidrogeológico .....	118
5.3.6. Modelos Matemáticos .....	118
<b>5.4. EJEMPLOS INTERNACIONALES .....</b>	<b>119</b>
5.4.1. Estados Unidos.....	119
5.4.2. Europa.....	120
<b>6. IMPACTO AMBIENTAL .....</b>	<b>122</b>
6.1. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS .....	122
6.2. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES QUÍMICAS .....	123
6.3. LIMITACIÓN DEL USO DE LA TIERRA.....	123
6.4. VARIACIONES DE LAS RESERVAS DE AGUA SUBTERRÁNEA .....	123
<b>7. PROGRAMAS PARA COMPUTADORA .....</b>	<b>124</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>125</b>
<b>9. ANEXO: EJEMPLOS DE DISEÑO Y PLANOS TÍPICOS.....</b>	<b>127</b>
<b>9.1. RELLENO DE GRAVA Y FILTRO.....</b>	<b>127</b>
9.1.1. Cálculo de un Relleno de Grava y Filtro.....	127
9.1.2. Determinación de la Abertura de un Filtro sin Relleno de Grava .....	128
<b>9.2. ENTUBADOS .....</b>	<b>129</b>
9.2.1. Entubado Telescópico de un Acuífero Semiconfinado .....	129
9.2.2. Entubado Continuo de un Acuífero Freático .....	131
<b>9.3. PROGRAMA DE TRABAJO PARA UNA PERFORACIÓN TELESCÓPICA .....</b>	<b>131</b>
<b>9.4. INTERPRETACIÓN DE UN ENSAYO DE ACUÍFERO .....</b>	<b>134</b>
<b>9.5. CALCULO DE LA EFICIENCIA DE UN POZO.....</b>	<b>135</b>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

### TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Velocidades sísmicas.....	<b>45</b>
<b>Tabla 2.</b> Análisis granulométrico .....	<b>127</b>
<b>Tabla 3.</b> Análisis granulométrico .....	<b>128</b>

## FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Sección vertical de un sistema de flujo de agua subterránea .....	<b>9</b>
<b>Figura 2.</b> Pozo de bombeo en un acuífero confinado .....	<b>13</b>
<b>Figura 3.</b> Pozo de bombeo en un acuífero libre.....	<b>14</b>
<b>Figura 4.</b> Pozo de bombeo en un acuífero semiconfinado.....	<b>16</b>
<b>Figura 5.</b> Curvas teóricas de tiempo – Depresión de acuífero confinado, libre con drenaje diferido y semiconfinado .....	<b>20</b>
<b>Figura 6.</b> Interfaz agua dulce – agua salada en un acuífero costero.....	<b>28</b>
<b>Figura 7.</b> Solución de Glover para la interfaz agua dulce – agua salada .....	<b>29</b>
<b>Figura 8.</b> Cono de agua salada debajo de un pozo de bombeo .....	<b>30</b>
<b>Figura 9.</b> Hidrograma .....	<b>35</b>
<b>Figura 10.</b> Dispositivo de medición geoelectrica.....	<b>41</b>
<b>Figura 11.</b> Configuraciones de electrodos de corriente (C) y de potencial (P) .....	<b>42</b>
<b>Figura 12.</b> Curva de un sondeo eléctrico vertical (Wenner).....	<b>43</b>
<b>Figura 13.</b> Propagación de ondas en sísmica de refracción.....	<b>45</b>
<b>Figura 14.</b> Gráfico tiempo - distancia correspondiente al sistema de la Figura 13.....	<b>47</b>
<b>Figura 15.</b> Perfilaje de potencial espontáneo y resistividad.....	<b>50</b>
<b>Figura 16.</b> Vista y malla de diferencias finitas de un acuífero hipotético .....	<b>78</b>
<b>Figura 17.</b> Esquema de una galería filtrante en terreno suelto.....	<b>84</b>
<b>Figura 18.</b> Diferentes esquemas de galerías filtrantes .....	<b>84</b>
<b>Figura 19.</b> Zanja de captación con pozo colector .....	<b>86</b>
<b>Figura 20.</b> Pozo radial .....	<b>88</b>
<b>Figura 21.</b> Pozos perforados con diferentes entubados .....	<b>91</b>
<b>Figura 22.</b> Protección sanitaria de la parte superior de un pozo perforado .....	<b>98</b>
<b>Figura 23.</b> Aspectos hidrogeológicos de un área de protección .....	<b>109</b>
<b>Figura 24.</b> Determinación de un área de protección por el método analítico de flujo uniforme .....	<b>117</b>
<b>Figura 25.</b> Curva de tamizado de la arena del acuífero y del prefiltro de grava .....	<b>128</b>
<b>Figura 26.</b> Curva acumulativa de un acuífero de arena gruesa.....	<b>129</b>
<b>Figura 27.</b> Entubado telescópico de un acuífero semiconfinado .....	<b>130</b>
<b>Figura 28.</b> Entubado continuo de un acuífero freático .....	<b>131</b>
<b>Figura 29.</b> Gráfico depresión – tiempo.....	<b>134</b>

## **PLANOS**

---

<b>Plano 1.</b> Perfil integral de perforación.....	137
---	-----



## **1. PRINCIPIOS BASICOS DE HIDROGEOLOGIA**

### **1.1. CICLO HIDROLÓGICO**

El ciclo del agua en la tierra o ciclo hidrológico, es la circulación continua del agua en sus diferentes estados en el planeta. No tiene principio ni fin, pero el concepto de ciclo hidrológico suele describirse normalmente comenzando desde los océanos porque éstos constituyen de lejos la fuente principal del agua en circulación.

La radiación solar evapora el agua de los océanos y en la atmósfera el vapor de agua asciende formando las nubes. Bajo ciertas condiciones, la humedad de éstas se condensa y cae a la superficie como lluvia, granizo o nieve, las diferentes formas de precipitación.

La precipitación que cae en tierra es el origen de prácticamente toda el agua dulce. Parte de esta precipitación, después de mojar las hojas y el suelo, corre por la superficie terrestre a los cursos de agua constituyendo el escurrimiento superficial y otra se infiltra en el suelo. Mucha de esta última es retenida en la zona de las raíces de las plantas y parte de ella vuelve a la atmósfera por la evapotranspiración. El excedente percola de la zona de raíces hacia abajo por la fuerza de gravedad y continúa su descenso hasta ingresar a un reservorio de agua subterránea.

El agua subterránea fluye a través de los materiales porosos saturados del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración y puede volver a surgir naturalmente como manantiales y caudal de base de los ríos. La mayoría de éstos devuelve el agua a los mares o la lleva a cuencas cerradas donde se evapora.

### **1.2. DEFINICIÓN, OCURRENCIA Y ORIGEN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.**

Agua subterránea es aquella parte del agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales.

Desde antiguo el agua subterránea ha sido una importante fuente de abastecimiento; antiguos pozos cavados pueden encontrarse a lo largo de los cauces secos en oriente medio, cuna de la civilización occidental, y algunos de los antiguos túneles o "ghanats" en Irán todavía están en uso.

Hoy en día constituye una importante fuente de abastecimiento para muchas ciudades, industrias, viviendas y cultivos irrigados. Como todo recurso natural, los del agua subterránea no son ilimitados y deben ser sabiamente administrados y protegidos contra su explotación irracional y contaminación.

No toda el agua del subsuelo es agua subterránea. En una excavación puede encontrarse humedad e incluso suelo saturado, pero si el agua no filtra libremente hacia el hueco cavado no se trata de agua subterránea. Ésta existe cuando el agua fluye hacia

la excavación. Puesto que el aire en el hueco cavado se encuentra a presión atmosférica, la presión en el agua subterránea debe ser superior a la atmosférica para que el agua pueda fluir por sí misma hacia el hueco. Por la misma razón, el agua del subsuelo que no fluye por sí misma hacia el hueco debe encontrarse a una presión inferior a la atmosférica.

Por ello, lo que distingue al agua subterránea del resto del agua del subsuelo es el hecho de que su presión es mayor que la atmosférica. Como esta agua entra libremente a los pozos movida por la fuerza de gravedad, también se la suele llamar agua gravitacional. Las profundidades en que se encuentra el agua subterránea pueden variar de menos de 1 m a más de 1000 m; también hay lugares donde nunca ha sido encontrada.

La zona situada entre la superficie del suelo y el techo del agua subterránea es denominada zona vadosa o no-saturada. Si bien esta zona contiene agua, ésta es retenida entre las partículas del subsuelo por fuerzas capilares. Aunque esta agua puede moverse dentro de la zona vadosa, no puede salir de ella hacia pozos u otros lugares expuestos a la presión atmosférica.

De las dos denominaciones indicadas, el término zona vadosa es el más correcto, debido a que en realidad en ella comúnmente existen zonas saturadas, incluso con agua a presión menor que la atmosférica. Tal es el caso con la franja capilar en el tope del agua subterránea, suelo superficial saturado con agua de lluvia y estratos de arcilla u otros materiales finos que retienen agua con más fuerza que materiales de grano grueso.

Siguiendo el mismo razonamiento, la zona de agua subterránea no debería ser llamada zona saturada, ya que en la misma pueden quedar atrapadas burbujas de aire. Sin embargo, por razones de simplicidad y costumbre, en adelante se hablará de zona vadosa y zona saturada. La línea divisoria entre las dos es la presión atmosférica, hallándose la presión del agua vadosa por debajo de la misma y la del agua subterránea por encima.

En estimaciones del balance hídrico global (Nace, 1960 y Feth, 1973), el agua subterránea representa aproximadamente el 0,6 % de las existencias totales de agua en el planeta. Por sus condiciones de profundidad y calidad, aproximadamente la mitad, unos  $4.2 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ , serían aprovechables, una cantidad mucho mayor que los  $0.126 \cdot 10^3 \text{ km}^3$  de agua dulce almacenada en lagos y ríos. Así, después de los glaciares y casquetes de hielo, los reservorios de agua subterránea son los depósitos más grandes de agua dulce del ciclo hidrológico.

Las precipitaciones son la fuente principal, casi exclusiva, del agua subterránea dulce. Al caer a la superficie terrestre el agua puede infiltrarse directamente o primero reunirse en ríos y lagos a través del escurrimiento superficial y de ahí ingresar al subsuelo. Para los Estados Unidos se estima que aproximadamente el 25 % de las precipitaciones se convierte en agua subterránea (Nace, 1960).

El agua subterránea de origen atmosférico que ha participado reciente (en sentido geológico, pudiendo significar varias decenas de miles de años) en ciclo hidrológico, se denomina agua meteórica. El agua subterránea que se encontraba en las formaciones geológicas en su momento de formación, por ejemplo el agua en la cual se depositaron materiales aluviales y que quedó ahí atrapada, se llama agua connata, es decir aquella que nació junto con los materiales geológicos que la contienen. También es de origen atmosférico, pero estuvo aislada del ciclo hidrológico por muchísimo tiempo, tal vez millones de años. Suele encontrarse en la parte inferior de profundas cuencas

hidrogeológicas y generalmente es de mala calidad. El agua juvenil o primaria es agua subterránea que nunca formó parte del ciclo hidrológico; proviene de procesos magmáticos y metamórficos, tiene elevada mineralización y probablemente es insignificante como recurso. Agua marina es el agua de los océanos que ha entrado a los acuíferos.

Las edades del agua subterránea, determinadas por datación isotópica, pueden variar entre unos pocos meses y años a decenas de miles de años o más. Agua meteórica antigua ocurre muchas veces en regiones áridas donde el agua subterránea se originó en períodos climáticos anteriores. Se encuentra especialmente en acuíferos profundos y puede coexistir con agua reciente en acuíferos superficiales.

### 1.3. ACUÍFEROS

Un acuífero se define como una unidad geológica saturada cuya permeabilidad es suficiente para entregar cantidades económicamente interesantes de agua a una captación. Los acuíferos más comunes son las arenas y gravas no consolidadas, pero rocas sedimentarias permeables tales como areniscas y calizas, y rocas cristalinas y volcánicas intensamente meteorizadas o fracturadas también pueden ser clasificadas como acuíferos.

Se denomina acuitardo a una unidad geológica con permeabilidad suficiente para transmitir cantidades significativas de agua a través de superficies grandes y/o períodos largos, pero cuya permeabilidad es insuficiente para justificar su alumbramiento. Las arcillas, limos y lutitas pertenecen a esta categoría.

Una unidad geológica es un acuicludo cuando no transmite agua en absoluto, por ejemplo rocas ígneas o metamórficas densas y no fracturadas. En la naturaleza, sin embargo, materiales realmente impermeables ocurren muy pocas veces; en alguna medida todos permiten la filtración de agua y por lo tanto deben ser clasificados como acuitardos.

A pesar de ello, en la práctica una unidad geológica puede considerarse acuicluda cuando su permeabilidad es varias órdenes de grandeza menor que la del acuífero adyacente.

#### 1.3.1. Tipos de Acuífero

Se distinguen tres tipos principales de acuíferos: confinados, libres y semiconfinados.

**Acuífero confinado.** Es aquel que se encuentra limitado arriba y abajo por un acuicludo y la unidad geológica que lo contiene está completamente saturada. Dentro del mismo el agua comúnmente está bajo presión, de manera que el nivel de agua en una perforación abierta en el acuífero, el nivel piezométrico se halla por encima del techo del mismo o incluso por encima de la superficie del terreno. En este caso se habla de un pozo surgente.

El agua en estos acuíferos proviene principalmente de la infiltración de agua de lluvia y/o superficial en su área de afloramiento y/o de recarga y eventualmente también del agua de acuíferos vecinos que ha logrado atravesar las capas confinantes.

**Acuífero libre.** Este tipo, también llamado freático o capa freática, tiene como base un acuicludo, pero en su techo no está restringido por una capa impermeable, sino que su límite superior es la superficie freática, donde la presión del agua es igual a la atmosférica. Por encima se encuentra la zona vadosa de modo que un acuífero libre está abierto a la atmósfera y como el agua no llena completamente la unidad geológica, la superficie freática puede subir y bajar libremente, en función de su recarga y descarga. Sin embargo las variaciones en la presión atmosférica no pueden afectar la posición de dicha superficie, aunque si pueden hacer variar transitoriamente el nivel de agua subterránea en un pozo abierto en este tipo de acuífero.

Al perforar un acuífero libre, el nivel de agua no asciende por encima de su techo, dado por la mencionada superficie freática.

El origen principal del agua subterránea en un acuífero libre es la infiltración de la precipitación y/o de ríos y lagos a través de toda la superficie del mismo.

**Acuífero semiconfinado.** Cuando un acuífero se encuentra limitado por acuitardos, sea en su base, techo o ambos, es un acuífero semiconfinado. El agua puede moverse libremente a través de los acuitardos, principalmente hacia arriba o hacia abajo debido a su baja permeabilidad. En una perforación en este tipo de acuífero, el nivel de agua generalmente se encuentra por encima de su techo, pudiendo coincidir con la superficie freática si ambos acuíferos se encuentran en equilibrio.

Si la permeabilidad del acuitardo es tan grande que la componente horizontal del flujo no puede ser ignorada, el acuífero es un intermedio entre el típico semiconfinado y el libre; por ello se lo suele llamar acuífero semilibre.

### **1.3.2. Propiedades Físicas**

El agua de los acuíferos se encuentra alojada en los espacios vacíos o intersticios del medio geológico que lo constituye. Estos intersticios actúan a la vez como depósitos y como conductos, permitiendo así al acuífero cumplir con sus dos funciones de almacenar y transmitir el agua subterránea.

Para poder cuantificar estos procesos, las propiedades físicas de los acuíferos han sido expresados en una serie de parámetros, que son expuestos en este capítulo.

#### **1.3.2.1. Intersticios**

Las diferencias en la cantidad, el tamaño, la forma, interconexión y disposición de los intersticios de acuífero, acuitardos y acuicludos resultan de la gran diversidad de procesos geológicos por los cuales las rocas y los sedimentos fueron originados y más tarde modificados. De ahí que una descripción prolija de la geología de un área es esencial para comprender la ocurrencia y el movimiento del agua subterránea en la misma.

Los intersticios de un material acuífero pueden ser divididos en dos grandes grupos: primarios u originales y secundarios. Los primeros nacieron junto con las formaciones geológicas y los segundos son el resultado de procesos posteriores que modificaron las rocas y sedimentos después de su formación.

Los intersticios primarios consisten en los espacios existentes entre las partículas que integran los sedimentos sueltos y consolidados, y en las cavidades e inclusiones en los cristales y los minúsculos espacios intercristalinos de las rocas ígneas.

Los intersticios secundarios comprenden principalmente las fisuras, diaclasas y otras fracturas originadas por el enfriamiento y la deformación de las rocas, y las aberturas de disolución producidas por la descomposición química y subsecuente remoción de materiales solubles. Otro tipo de intersticios secundarios, generalmente no considerados pero muy importantes en la Argentina donde existen en los limos loésicos de la llanura pampeana, son los pequeños tubos y canalículos dejados por raíces y animales.

### 1.3.2.2. Textura de los Sedimentos

Como se indicó, los acuíferos más comunes y difundidos son los constituidos por sedimentos sueltos, especialmente arenas y gravas. De la textura de éstos depende no sólo sus propiedades hidráulicas sino también los detalles constructivos más importantes de las captaciones de agua subterránea.

De las diversas características texturales de un sedimento, la más importante, y frecuentemente casi exclusiva, es la determinada por el tamaño del grano (y su distribución).

Esta determinación se lleva a cabo mediante el análisis mecánico, principalmente por tamizado del sedimento normalmente mediante tamices superpuestos para hallar las cantidades (en peso) correspondientes a las diferentes fracciones de tamaño existentes. La escala de clasificación más difundida y utilizada es la siguiente, creada por Wentworth, con adaptaciones realizadas por González Bonorino, F. y Teruggi, M.E. (1961):

Denominación	Tamaño (mm)
Aglomerado	> 256
Grava gruesa	256-64
Grava mediana	64-16
Grava fina o gravilla	16-4
Sábulo	4-2
Arena muy gruesa	2-1
Arena gruesa	1-0.5
Arena mediana	0.5-0.25
Arena fina	0.25-0.125
Arena muy fina	0.125-0.0625
Limo	0.0625-0.0039
Arcilla	< 0.0039

Para conocer la distribución, los resultados del análisis se representan en papel semilogarítmico como curva acumulativa, con los tamaños en las abscisas logarítmicas y los

porcentajes, retenidos y/o pasantes por los tamices, en ordenadas aritméticas. El tamaño de la abertura del tamiz que retiene el 90 % del material se denomina tamaño efectivo y el correspondiente al 50 % tamaño medio.

Un sedimento uniforme o bien seleccionado se compone de muy pocas fracciones de tamaño, por ejemplo una o dos y uno mal seleccionado tiene partículas de muchos tamaños. La uniformidad de un material granular se expresa mediante el coeficiente de uniformidad, dado por el cociente entre los tamaños de las aberturas de los tamices que retienen el 40 % y 90 %. Así, cuanto más uniforme es un material, menor es su coeficiente de uniformidad y un material mal seleccionado tiene un coeficiente mayor.

### 1.3.2.3. Porosidad (m)

La porosidad de una roca o sedimento es una medida de su espacio intersticial. Si se considera que el volumen total  $V_t$  de un material es la suma del volumen de su parte sólida  $V_s$  y del de sus poros o intersticios  $V_i$ , la porosidad puede definirse como la relación entre el volumen de espacios vacíos y el total, o sea

$$m = V_i / V_t$$

pudiendo ser expresada como fracción decimal o como porcentaje.

En general una porosidad superior a 0.20 es considerada grande, entre 0.05 y 0.20 mediana y una menor de 0.05 pequeña.

La porosidad de un depósito sedimentario no consolidado depende principalmente de la forma, disposición y grado de selección de sus partículas y sólo en segundo lugar del tamaño de grano. Sedimentos de grano fino suelen presentar una porosidad mayor que los de grano grueso, pero depósitos de grava pueden tener la misma porosidad que uno de arena. La porosidad es menor en sedimentos mal seleccionados, donde los granos finos rellenan los espacios entre los grandes.

La porosidad es clasificada en primaria y secundaria según corresponda uno u otro tipo de intersticios. Cuando una roca con porosidad primaria, por ejemplo una arenisca, es fracturada, constituye un sistema de doble porosidad, ya que coexisten los dos tipos.

### 1.3.2.4. Coeficiente de Almacenamiento (S)

Es la cantidad de agua liberada por unidad de superficie del acuífero y por unidad de descenso del nivel piezométrico perpendicular a dicha superficie. Como el coeficiente se refiere a un volumen de agua por otro de acuífero, no tiene dimensión.

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.

### 1.3.2.5. Porosidad Eficaz (S')

Cuando el agua de un material saturado es drenado por la fuerza de gravedad, sólo se libera una parte del volumen total almacenado en los poros. La cantidad de agua que una unidad de volumen de un acuífero libre entrega por gravedad se llama porosidad eficaz o rendimiento específico. De acuerdo a Walton (1970, en Driscoll 1986), la porosidad eficaz de algunos tipos de rocas y sedimentos es la siguiente:

Arcilla	1 - 10 %
Arena	10 - 30 %
Grava	15 -30 %
Grava y arena	15 - 25 %
Arenisca	5 -15 %
Lutita	0.5 - 5 %
Caliza	0.5 - 5 %

Parte del agua es retenida en los poros por fuerzas de atracción molecular y de capilaridad y la cantidad de agua que una unidad de volumen de un acuífero libre retiene después del drenaje gravitacional se denomina retención específica. Esta es mayor en sedimentos finos, de manera que éstos tienen una porosidad eficaz menor que sedimentos gruesos, aunque ambos puedan tener la misma porosidad.

La suma de la porosidad eficaz y la retención específica es igual a la porosidad de un acuífero; ambas se expresan en porcentajes o fracciones decimales. La porosidad eficaz de un acuífero libre varía entre 0.01 y 0.30 y en la practica es igual a su coeficiente de almacenamiento. Es decir, la cantidad de agua entregada por unidad de superficie del acuífero y por unidad de descenso del nivel freático. (En rigor el coeficiente de almacenamiento de un acuífero libre es igual a la suma de su porosidad eficaz y de su coeficiente de almacenamiento elástico, pero este último es completamente despreciable frente a la primera).

### 1.3.2.6. Conductividad Hidráulica (K)

También llamada coeficiente de permeabilidad, se refiere a la capacidad de un material poroso, por ejemplo un acuífero, de transmitir agua y se define como el volumen de agua que se mueve a través de un medio poroso en la unidad de tiempo bajo la unidad de gradiente hidráulico y a través de la unidad de sección transversal perpendicular a la dirección de flujo. Tiene las dimensiones de longitud/tiempo, por ejemplo metros/día.

Depende del tamaño y la forma de los intersticios, del grado de su interconexión y de las propiedades físicas del fluido. Si los conductos que comunican los poros son pequeños, el flujo del agua de uno a otro se ve dificultado y la conductividad hidráulica es baja. En un sedimento más o menos grueso y/o bien seleccionado la conexión entre poros es buena y la permeabilidad grande.

Las propiedades físicas del agua varían con la temperatura, y la conductividad hidráulica es definida sobre la base de la viscosidad y densidad a una cierta temperatura, normalmente 20° C.; la compresibilidad del agua es despreciable.

### 1.3.2.7. Transmisividad (T)

Es una propiedad vinculada a la anterior e indica la capacidad de un acuífero de transmitir agua a través de todo su espesor y es igual a la conductividad hidráulica multiplicada por el espesor saturado del acuífero. En consecuencia es el caudal de flujo bajo un gradiente unitario a través de una sección transversal de ancho unitario de todo el espesor acuífero. Tiene las dimensiones longitud<sup>2</sup> / tiempo, por ejemplo m<sup>2</sup>/día.

Un valor puede variar desde menos de 10 m<sup>2</sup>/d a más de 10.000 m<sup>2</sup>/d. Un acuífero con una transmisividad de 10 m<sup>2</sup>/d o menos, solo puede proveer agua suficiente para pozos domésticos u otros usos de bajo caudal.

Cuando la transmisividad es de 100 m<sup>2</sup>/d o más, el caudal de los pozos puede ser adecuado para abastecimiento municipal, industrial o irrigación. (Driscoll F.G. 1986).

### 1.3.2.8. Resistividad Hidráulica (c)

Caracteriza a la resistencia de un acuitardo al flujo vertical, tanto ascendente como descendente, y se define como el cociente entre el espesor del acuitardo y la conductividad hidráulica vertical del mismo; tiene la dimensión de tiempo, generalmente días. Sus valores varían en un rango muy amplio, desde algunos cientos a varias decenas de miles de días y para acuicludos es infinito.

También se suele emplear su inverso denominado coeficiente de goteo, expresado en 1/día.

### 1.3.2.9. Factor de Filtración (B)

Es una medida para la distribución espacial de la filtración a través de un acuitardo a un acuífero semiconfinado o al revés. Se define como la raíz cuadrada del producto de la transmisividad por la resistividad hidráulica, o sea  $B = (T \cdot c)^{1/2}$ . Tiene la dimensión de longitud, por ejemplo metro. Valores altos de B indican una filtración reducida y valores pequeños una filtración alta.

### 1.3.2.10. Anisotropía y Heterogeneidad

La mayoría de las ecuaciones hidráulicas se basan en la suposición que los acuíferos y acuitardos son homogéneos e isótropos, eso es, la conductividad hidráulica es la misma en cualquier parte de la unidad geológica y en todas las direcciones. Sin embargo las partículas individuales de una formación geológica muy rara vez son esféricas, de manera que cuando son depositados dentro del agua tienden a asentarse en su lado plano. Tal unidad aun puede ser homogénea, pero su conductividad hidráulica en dirección horizontal será mayor que en la vertical.

Además la litología de las unidades geológicas suele variar considerablemente tanto horizontal como verticalmente. En consecuencia generalmente son heterogéneas: pueden estar estratificadas en capas de diferente granulometría, las capas individuales pueden acuñarse, su granulometría variar en dirección horizontal, etc.

En rocas consolidadas, anisotropía y heterogeneidad suelen ser muy comunes. En una roca fracturada la conductividad hidráulica es en general considerablemente mayor en

dirección de las fracturas principales que normal a ellas, y en los sectores ubicados entre fracturas incluso puede ser nula.

#### 1.4. MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

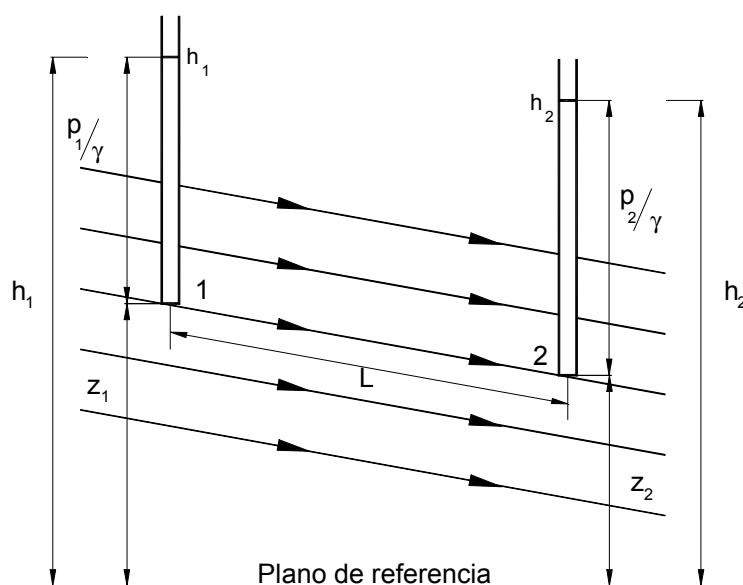
En cada punto de un medio saturado existe en el agua una presión  $p$ , tal que si en ese punto se coloca un tubo vertical, el agua, de peso específico  $\gamma$ , sube en el mismo una altura  $p/\gamma$ .

Si se toma como referencia un cierto plano horizontal de modo que  $z$  es la elevación del punto en cuestión sobre ese plano (ver **Figura 1**) la altura total del agua en el tubo es

$$h = p/\gamma + z$$

La altura total  $h$  así definida se denomina nivel piezométrico;  $p/\gamma$  es la altura de presión y  $z$  es la altura de elevación (generalmente la cota).

Para que el agua subterránea pueda moverse de un punto a otro debe existir una diferencia entre los niveles piezométricos de ambos puntos. El movimiento se produce de un sitio de alto nivel a otro de bajo nivel piezométrico, independientemente de la presión existente en los mismos, pudiendo incluso desplazarse hacia un punto de mayor presión. Por ejemplo en un acuífero confinado en regiones montañosas, el agua fluye desde el área de recarga, con alto nivel piezométrico y baja presión, hacia el centro de la cuenca donde existe alta presión y bajo nivel piezométrico.



**Figura 1.** Sección vertical de un sistema de flujo de agua subterránea

### 1.4.1. Ley de Darcy

Establece que el flujo de agua a través de un medio poroso es proporcional a la diferencia de alturas piezométricas e inversamente proporcional a la longitud de la línea de flujo:

$$v = K \cdot (h_1 - h_2) / L$$

donde  $v$  = velocidad de flujo “de Darcy”

$h_1$  = nivel piezométrico en el punto 1

$h_2$  = nivel piezométrico en el punto 2

$L$  = distancia entre los puntos 1 y 2 a lo largo de la línea de flujo

$K$  = conductividad hidráulica (definida en un apartado anterior)

La velocidad de flujo se llama “de Darcy” porque se supone que el flujo ocurre a través de toda la sección transversal del material poroso, a pesar del hecho de que las partículas sólidas constituyen una gran parte del mismo. La ley proporciona una forma para cuantificar la energía (altura piezométrica) requerida para mover el agua a través de un acuífero; la pérdida de energía (altura piezométrica) es causada por la fricción entre el agua en movimiento y las paredes de los poros.

Por definición el gradiente hidráulico es

$$I = (h_1 - h_2) / L$$

y así el caudal del flujo a través de una sección  $A$  está dado por

$$Q = K \cdot I \cdot A$$

Esta forma de la ley de Darcy es más interesante porque generalmente el caudal de un acuífero es el factor más importante. El flujo total a través de una sección vertical de un acuífero puede entonces calcularse conociendo su espesor total, su ancho, su conductividad hidráulica media y su gradiente hidráulico, siendo este último la pendiente de su superficie freática o piezométrica.

En la aplicación de la ley de Darcy debe tenerse en cuenta su rango de validez. Solamente es válida cuando el flujo es laminar, como ocurre en la mayoría de los acuíferos, pero no en presencia de flujo turbulento, como puede presentarse en basaltos fracturados, calizas cársticas o en las inmediaciones de pozos y vertientes.

El criterio utilizado para distinguir un tipo de flujo del otro es el Número de Reynolds ( $R_e$ ), que relaciona el diámetro de las partículas o poros, la velocidad del fluido y su densidad y viscosidad. Trabajos experimentales mostraron que la ley de Darcy es estrictamente válida para  $R_e < 1$  y que hasta  $R_e = 10$  no se presentan errores importantes, siendo este último entonces su límite de validez.

Para flujo turbulento la relación entre gradiente hidráulico y velocidad de flujo ya no es lineal, pero por suerte la gran mayoría del flujo de agua subterránea ocurre con  $Re < 1$ , con las excepciones arriba mencionadas.

La ley tampoco vale en presencia de gradientes hidráulicos muy elevados, como puede ocurrir en arcillas a raíz de su estructura cristalina.

#### **1.4.2. Velocidad Real**

La velocidad “de Darcy” es un concepto macroscópico ya que considera que el agua se mueve, como ya se dijo, a través de toda la sección del medio poroso, tanto partículas como intersticios. Si se desea conocer la velocidad real, por ejemplo en problemas de contaminación o transporte de solutos, debe tenerse en cuenta los caminos verdaderos de las partículas de agua a través de los intersticios del medio poroso. En otras palabras, debe considerarse la porosidad del medio y :

$$V_r = V / m$$

siendo  $V_r$  = velocidad real

$V$  = velocidad de flujo o “de Darcy”

$m$  = porosidad (definida en un apartado anterior)

Debe recordarse que la velocidad real calculada por la fórmula anterior es solamente una aproximación. En algunas partes de un acuífero las vías que interconectan los poros pueden ser líneas rectas en la dirección del flujo mientras que en otras el agua puede ser obligada a caminos largos y tortuosos para recorrer distancias más bien cortas en la dirección de flujo.

#### **1.4.3. Hipótesis de Dupuit-Forchheimer**

La ley de Darcy puede resolver sistemas de flujo simples con componentes en una sola dirección, vertical u horizontal. Como gran parte de los acuíferos tienen movimientos del agua en ambas direcciones, estos sistemas deben ser simplificados antes de poder aplicar la fórmula de Darcy. Dupuit en 1863 y Forchheimer en 1901 introdujeron entonces la hipótesis de que el flujo es puramente horizontal y además uniformemente distribuido sobre toda la sección vertical del acuífero. Ha sido comprobado que estas aproximaciones dan soluciones suficientemente exactas para superficies freáticas con pendientes suaves.

### **1.5. HIDRÁULICA DE POZOS**

La extracción de agua subterránea siempre está asociada a un descenso del nivel de agua, denominado depresión.

Una variedad de ecuaciones ha sido desarrollada para relacionar el caudal de los pozos con la depresión de la superficie piezométrica (o freática) y los parámetros hidráulicos de los acuíferos.

Estas fórmulas corresponden a dos grandes grupos, las de flujo en régimen estacionario y las de flujo en régimen transitorio. El régimen estacionario es un estado de equilibrio en el cual no se producen variaciones con el transcurso del tiempo. En la práctica se presenta muy pocas veces, pero puede ser alcanzado cuando se bombea un acuífero con buena recarga o en forma aproximada cuando después de bombeos prolongados la depresión es muy lenta.

En las ecuaciones de régimen transitorio interviene el factor tiempo; estas ecuaciones permiten calcular el descenso de la superficie piezométrica o freática con relación al tiempo transcurrido desde el inicio de la extracción de agua.

Las ecuaciones desarrolladas requieren en general las siguientes hipótesis básicas:

- 1). El acuífero es homogéneo, isótropo, horizontal, de espesor constante y de una extensión horizontal infinita.
- 2). Hay un solo pozo en funcionamiento, bombeando un caudal constante.
- 3). El filtro del pozo abarca todo el espesor acuífero.
- 4). El nivel piezométrico anterior al bombeo es constante y uniforme en todo el acuífero.
- 5). En respuesta al descenso del nivel piezométrico, el agua almacenada en el acuífero es liberada en forma instantánea.

### **1.5.1. Régimen Estacionario**

#### **1.5.1.1. Acuífero Confinado**

En un acuífero confinado el flujo alrededor de un pozo de bombeo es horizontal y en régimen estacionario proviene de muy lejos (en principio del infinito), de modo que el flujo a través de una superficie cilíndrica imaginaria a una distancia  $r$  del pozo bombeado es igual al caudal bombeado.

Como el área de la superficie de un cilindro es  $2 \cdot \pi \cdot r \cdot b$ , mediante la ley de Darcy este caudal puede ser expresado por

$$Q = K \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot b \cdot (dh/dr)$$

donde  $Q$  = caudal bombeado

$K$  = conductividad hidráulica del acuífero

$r$  = distancia radial desde el centro del pozo

$b$  = espesor del acuífero

$dh/dr$  = gradiente hidráulico

La integración de esta ecuación entre dos puntos  $r_1$  y  $r_2$  a diferentes distancias del pozo (**Figura 2**) y con niveles piezométricos  $h_1$  y  $h_2$ , respectivamente da

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot K \cdot b (h_2 - h_1) / \ln (r_2/r_1)$$

o

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot T (h_2 - h_1) / \ln (r_2/r_1)$$

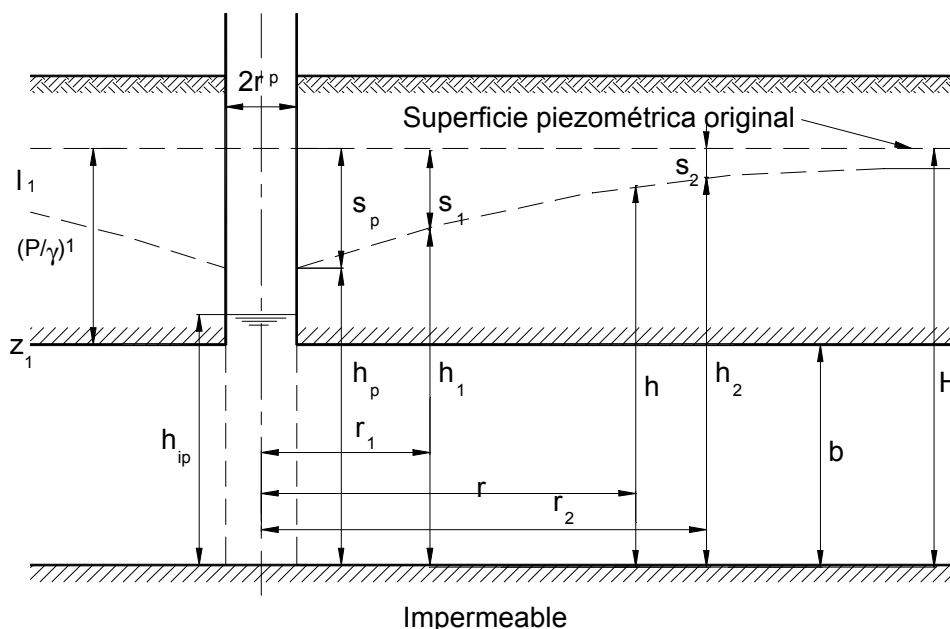
donde  $T = Kb$  es la transmisividad del acuífero y el nivel piezométrico  $h$  es referido a la base del acuífero.

Esta ecuación se conoce como la fórmula de Thiem, quien, junto con su hijo, la desarrolló a fines del siglo pasado.

La fórmula anterior permite calcular  $Q$  en relación a la medición de  $h$  a dos distancias diferentes del pozo. Si se toma  $r_2$  tan grande que  $h_2$  corresponde al valor original o estático  $H$  de la superficie piezométrica y  $r_1$  igual al radio del pozo  $r_p$ , puede determinarse el nivel piezométrico  $h_p$  en el pozo. (Ver **Figura 2**).

Esto sería en un pozo ideal, pero en realidad hay pérdidas de carga adicionales por la fricción al penetrar el agua al pozo a través del filtro y la altura del agua en el mismo es  $h_{ip}$ , menor que  $h_p$ .

El valor de  $r$  donde la depresión de la superficie piezométrica es insignificante se llama radio de influencia del pozo.



**Figura 2.** Pozo de bombeo en un acuífero confinado

### 1.5.1.2. Acuífero Libre

En un acuífero libre el sistema de flujo alrededor de un pozo (**Figura 3**) puede ser analizado con la hipótesis de Dupuit-Forchheimer y reemplazando el espesor  $b$  por la altura  $h$  de la superficie freática sobre la base del acuífero, la ecuación de Darcy es

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot K \cdot (dh/dr)$$

Reagrupando variables e integrando entre  $r_2$ ,  $h_2$  y  $r_1$ ,  $h_1$  se obtiene

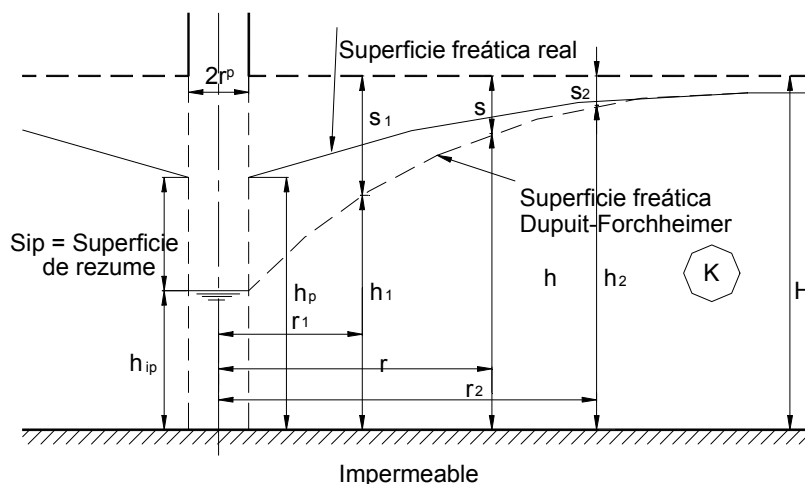
$$Q = \pi \cdot K \cdot (h_2^2 - h_1^2) / \ln(r_2/r_1)$$

En este tipo de acuífero, la altura del agua  $h_{ip}$  en el interior del pozo siempre es menor que la altura  $h_p$  de la superficie freática en la pared exterior del mismo, aún considerando nulas las pérdidas de carga por la entrada del agua al pozo. Eso ocurre debido a la superficie de rezume que se origina cada vez que el agua drena libremente de una pared de un material saturado expuesta a la atmósfera.

La superficie freática dentro el material saturado intersecta entonces la pared a una cierta distancia por encima de la superficie libre del agua al otro lado de la pared, formando una superficie de rezume por la cual el agua escurre a lo largo de la superficie saturada hacia el nivel libre del agua.

Investigaciones teóricas y experimentales han demostrado que el empleo de  $h_{ip}$  en vez de  $h_p$  para  $h_1$  de la ecuación anterior, introduce un error de solamente 1 a 2 % en el valor verdadero del caudal calculado. Nuevamente esto solamente vale para pozos ideales, ya que por las pérdidas de carga debidas a la fricción el nivel de agua en el pozo es inferior a  $h_{ip}$ .

Debido a la superficie de rezume en la pared del pozo y a la existencia de componentes verticales en el flujo del agua subterránea en los alrededores del pozo, la ecuación arriba indicada, basada en la hipótesis de Dupuit-Forchheimer de flujo horizontal, no representa con precisión la altura de la superficie freática. Recién a una distancia de:  $r > 1,5 H$  los efectos del flujo vertical son despreciables y el nivel freático calculado con esa fórmula esencialmente correcto.



**Figura 3.** Pozo de bombeo en un acuífero libre

### 1.5.1.3. Acuífero Semiconfinado

En la naturaleza este tipo de acuífero es mucho más frecuente que uno completamente confinado. Las capas confinantes en el techo y/o la base de un acuífero casi siempre presentan algún grado de permeabilidad.

Cuando se extrae de un acuífero semiconfinado (**Figura 4**), el agua no sólo proviene de ese acuífero sino también de los horizontes adyacentes.

El agua aportada por un acuitardo viene de la almacenada en el acuitardo y de la que se filtra a través de él desde un acuífero adyacente no explotado. A medida que el bombeo continúa, cada vez más agua sale del acuífero adyacente y menos del acuitardo y del bombeo. Con el tiempo, la recarga por filtración equilibra la extracción y el flujo alcanza un régimen estacionario.

Las soluciones halladas se basan en varias hipótesis muy restrictivas y a las hipótesis de base antes mencionadas se agregan las siguientes:

- La recarga se establece a partir de un único acuífero situado encima o debajo del semiconfinado.
- El flujo es exclusivamente vertical en el acuitardo y horizontal en el acuífero semiconfinado.
- El nivel piezométrico del acuífero adyacente permanece constante.
- El caudal de infiltración es proporcional al gradiente hidráulico a través del acuitardo.

Para estas condiciones y el flujo en estado de equilibrio, De Glee (1930, 1951, según Kruseman y de Ridder, 1990) derivó la siguiente fórmula:

$$s = Q \cdot K_0(r/B) / 2 \cdot \pi \cdot T$$

donde

$s$  = depresión (estabilizada) en un piezómetro a una distancia  $r$  del pozo de bombeo;

$Q$  = caudal del pozo

$B$  = factor de filtración  $(T \cdot c)^{1/2}$

$c$  = resistividad hidráulica del acuitardo  $b'/K'$

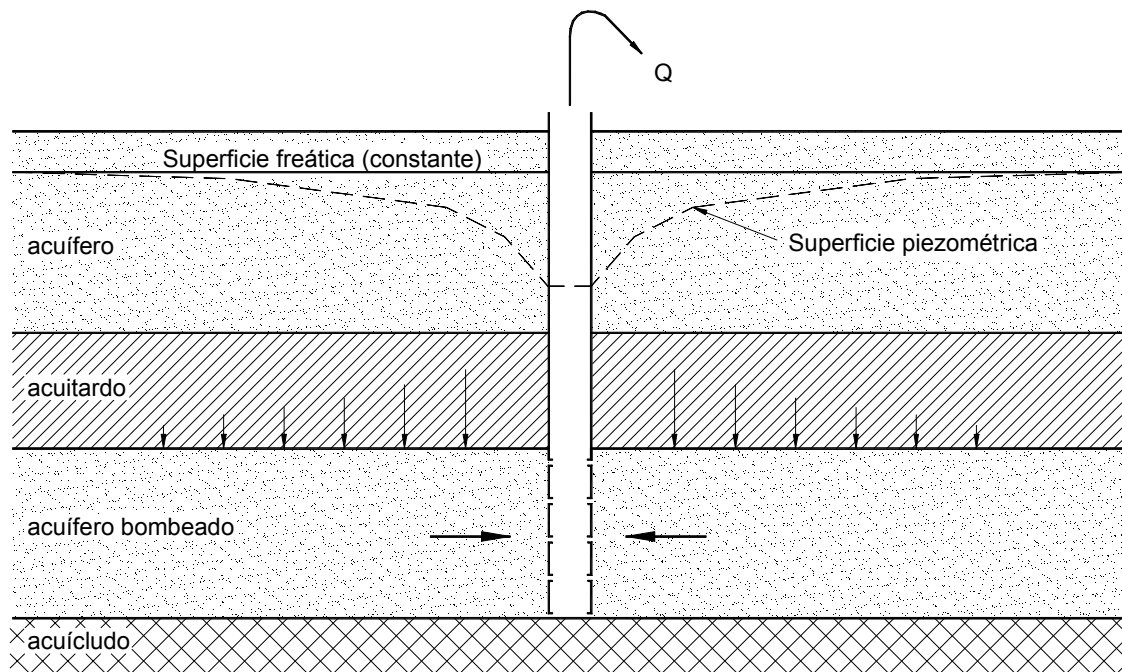
$b'$  = espesor del acuitardo

$K'$  = conductividad hidráulica vertical del acuitardo

$T$  = transmisividad del acuífero

$K_0$  = función de Bessel modificada de segunda especie y orden 0.

Los valores de la función matemática  $Ko(x)$  para diferentes valores de  $x$  (siendo en este caso  $x = r/B$ ) se encuentran tabuladas en los manuales matemáticos y en varios de los textos de Hidrogeología de la lista bibliográfica, por ej. Custodio, E. y Llamas, M.R. (1976).



**Figura 4.** Pozo de bombeo en un acuífero semiconfinado

## 1.5.2. Régimen Transitorio

### 1.5.2.1. Acuífero Confinado

Cuando un pozo, en un acuífero de extensión infinita, extrae agua a caudal constante, la influencia del bombeo se extiende con el tiempo. Debido a que el agua sale exclusivamente del almacenamiento del acuífero, el nivel piezométrico continua descendiendo indefinidamente. Por eso un régimen estacionario no puede existir, aunque el ritmo del descenso disminuye con el tiempo (**Figura 5 A**) a medida que el área de influencia se expande.

Theis (1935) fue el primero en desarrollar una fórmula para el flujo transitorio, basada en la analogía entre el flujo de agua subterránea y la conducción del calor (una deducción abreviada puede encontrarse en Custodio et al, 1976). Con la hipótesis de que el pozo es de diámetro infinitesimal y considerando que antes del bombeo la depresión  $s = 0$  y que  $s$  tiende a cero para  $r$  tendiendo a infinito para cualquier tiempo después de iniciado el bombeo, la ecuación hallada es

$$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

donde  $s$  = depresión a una distancia  $r$  del pozo

$Q$  = caudal constante del pozo

$T$  = transmisividad del acuífero

$u = r^2 \cdot S / (4 \cdot T \cdot t)$

$S$  = coeficiente de almacenamiento del acuífero

$t$  = tiempo desde el comienzo del bombeo

La integral exponencial se conoce como "función de pozo de Theis" y su solución es la siguiente serie convergente

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - u^2 / (2 \cdot 2!) + u^3 / (3 \cdot 3!) - u^4 / (4 \cdot 4!) + \dots$$

Si se conocen los parámetros hidráulicos  $T$  y  $S$  del acuífero y el caudal  $Q$  de bombeo, puede hallarse el nivel piezométrico en un acuífero confinado a cualquier distancia  $r$  del pozo y en cualquier momento  $t$  después de iniciado el bombeo. Simplemente se calcula  $u$  con la ecuación arriba indicada, se busca el valor correspondiente de  $W(u)$  en las tablas de cualquier libro de hidrogeología y se calcula  $s$  con la fórmula de Theis.

También es posible calcular los valores de  $s$  para diferentes distancias  $r$  en un mismo momento  $t$  y se obtienen los valores del cono de depresión de la superficie piezométrica alrededor del pozo.

Igualmente puede seguirse el camino inverso y determinar los parámetros  $T$  y  $S$  del acuífero. En efecto, observando la fórmula de Theis puede verse que si se mide  $s$  para una o más distancias  $r$  y diversos valores de  $t$ , conociendo el caudal  $Q$  puede hallarse  $T$  y  $S$ .

Sin embargo la presencia de dos incógnitas y la naturaleza de la integral exponencial hacen imposible una solución explícita directa y Theis diseñó entonces su método de superposición de curvas. Este se basa en el hecho de que si se grafica  $s$  en función de  $r^2/t$  o  $t$  y  $W(u)$  en función de  $u$  en el mismo papel doble logarítmico, las curvas resultantes (la de datos medidos y la curva patrón, respectivamente) van a tener la misma forma, pero horizontalmente y verticalmente desplazadas.

Las dos curvas pueden hacerse coincidir y con la coordenadas  $s$ ,  $r^2/t$ ,  $u$  y  $W(u)$  de un punto de control puede calcularse  $T$  y  $S$  mediante las ecuaciones arriba indicadas de  $s$  y  $u$ .

### 1.5.2.2. Acuífero Semiconfinado

Para este tipo de acuífero, cuyas propiedades ya han sido descritas en la sección de régimen estacionario, el desarrollo de la teoría de flujo se hizo en dos etapas distintas. La primera, realizada por Hantush y Jacob (1955) y Hantush (1956, 1960), produjo la

diferenciación entre la respuesta de Theis y la de un acuífero semiconfinado ((Figura 5 C), utilizando las hipótesis básicas ya enunciadas para el flujo estacionario.

En la segunda, Neuman y Witherspoon (1969a, 1969b, 1972) evaluaron el significado de esas hipótesis restrictivas de los trabajos anteriores y desarrollaron soluciones más generales.

Sin embargo, debido a su mucho mayor simplicidad, la solución analítica de Hantush y Jacob es la más utilizada. Esta se expresa de la misma forma como la ecuación de Theis, pero con una función de pozo más complicada que incluye el parámetro adimensional  $r/B$ :

$$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u, r/B)$$

siendo  $r$  = distancia al pozo de bombeo

$B$  = factor de filtración

Los valores de  $W(u, r/B)$  en función de  $u$  fueron tabulados por Hantush y se pueden encontrar también en los libros de texto (por ej. (Custodio, 1976; Kruseman y de Ridder, 1970; Walton, 1970). Su empleo, sea para calcular las depresiones alrededor de un pozo o para determinar los parámetros hidráulicos de un acuífero semiconfinado, es equivalente al del método de Theis, sólo que en vez de una curva patrón hay una para cada valor de  $r/B$ , reunidas en un sólo gráfico.

### 1.5.2.3. Acuífero Libre

En el caso de un acuífero libre existen algunas diferencias importantes con respecto al flujo en un acuífero confinado. Cuando se extrae agua de un acuífero libre, el gradiente hidráulico que es inducido por el bombeo crea un cono de depresión en la superficie freática en el cual existen componentes verticales de flujo.

El agua producida por el pozo se origina tanto por los dos mecanismos propios del flujo confinado como también por un verdadero drenaje del acuífero libre.

Existen esencialmente tres caminos que pueden ser usados para predecir el crecimiento en el tiempo y en el espacio del cono de depresión en un acuífero libre. El primero, que puede denominarse el análisis completo, reconoce que el problema hidráulico de pozos en un acuífero libre involucra un sistema de flujo saturado - no saturado en el cual los descensos de la superficie freática son acompañados por cambios en el contenido de humedad de la zona vadosa encima de la superficie freática. Ese análisis completo requiere soluciones que incluyen tanto la zona saturada como la vadosa mediante modelos matemáticos. La conclusión general de los estudios realizados es que la posición de la superficie freática durante el bombeo no es substancialmente afectada por la naturaleza del flujo no saturado encima de ella. En otras palabras hay poca ventaja práctica en este enfoque y como las propiedades de la zona vadosa son extremadamente difíciles de medir in situ, esta solución de análisis completo es muy pocas veces aplicada.

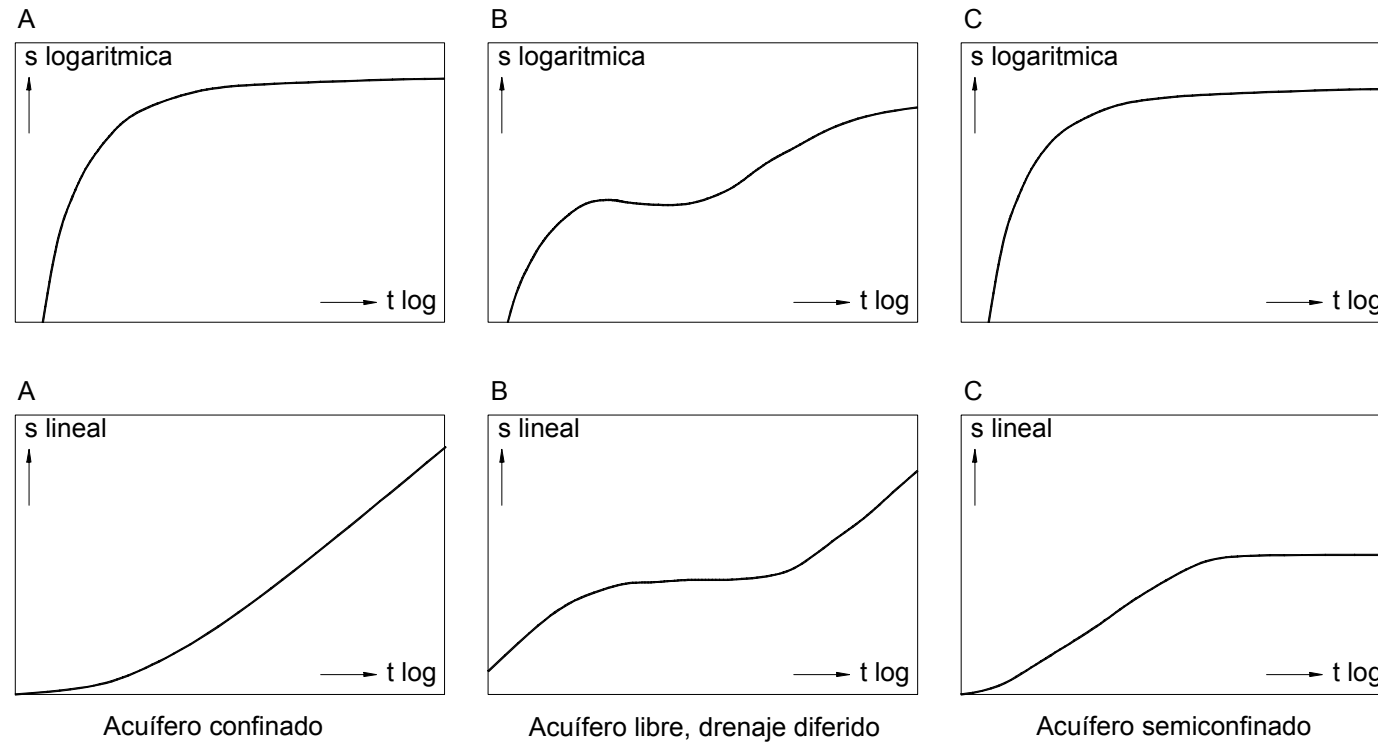
El segundo camino, que es de lejos el más sencillo, consiste en usar la misma ecuación del acuífero confinado pero con la función de pozo definida en términos de la porosidad eficaz en vez del coeficiente de almacenamiento. Además la transmisividad debe ser definida como  $T = K \cdot b$  donde  $K$  es la permeabilidad y  $b$  es el espesor saturado inicial del

acuífero. Jacob (1950) ha mostrado que este método conduce a depresiones bastante correctas siempre que la depresión sea pequeña en comparación con el espesor saturado total. En efecto el método se basa en las hipótesis de Dupuit-Forchheimer y falla cuando los gradientes verticales se hacen importantes.

El tercer método, y el más usado en la práctica, se basa en el concepto de drenaje diferido. Los trabajos pioneros corresponden a Boulton entre 1954 y 1963, con importantes aportes e innovaciones realizadas por Neuman entre 1972 y 1975.

Puede observarse que en piezómetros adyacentes a pozos de bombeo en acuíferos libres los niveles de agua tienden a descender a un ritmo menor que el determinado por la ecuación de Theis y las curvas de depresión - tiempo en papel logarítmico muestran una típica forma de S acostada, en la cual pueden distinguirse 3 segmentos diferentes (ver **Figura 5 B**).

En el primero, que dura solamente un corto período después de iniciado el bombeo, el acuífero libre reacciona de la misma manera como lo hace un acuífero confinado. El agua es cedida instantáneamente del almacenamiento por la compactación del acuífero y la expansión del agua. Durante el segundo segmento los efectos del drenaje gravitacional se hacen sentir a través de una disminución de la pendiente de la curva con relación a la curva de Theis porque el agua entregada al pozo por el drenaje que acompaña el descenso de la superficie freática es mayor que el que sería entregado por un descenso igual de la superficie piezométrica de un acuífero confinado. Durante el tercer segmento, que puede comenzar después de unos minutos o a los varios días de haber empezado a bombear, la curva nuevamente tiende a ajustarse a la curva de Theis.



**Figura 5.** Curvas teóricas de tiempo – Depresión de acuífero confinado, libre con drenaje diferido y semiconfinado

Boulton creó una solución matemática semiempírica que reproduce los tres segmentos de la curva depresión- tiempo en un acuífero libre, pero requiere la definición de un Índice de Retraso empírico que no estaba claramente relacionado con algún fenómeno físico.

Las investigaciones más recientes, dirigidas a descubrir los procesos físicos responsables de la respuesta diferida en un acuífero libre, demostraron que el Índice de Retraso no es una constante acuífera como Boulton originalmente había supuesto, sino que está relacionado a la componente vertical del flujo y aparentemente es una función del radio  $r$  y tal vez del tiempo  $t$ .

La solución general de Boulton (en Kruseman y de Ridder, 1970) de la ecuación de flujo es una ecuación diferencial bastante complicada que, simbólicamente y por analogía con la ecuación de Theis se puede expresar de la forma

$$s = (Q / 4 \cdot \pi \cdot T) \cdot W(u_{AB}, r / D)$$

A la expresión  $W(u_{AB}, r / D)$  se la puede llamar “ecuación del pozo de Boulton”.

Durante un primer período esta ecuación describe el primer segmento de la curva tiempo – depresión y la ecuación anterior se reduce a

$$s = (Q / 4 \cdot \pi \cdot T) \cdot W(u_A, r / D)$$

donde  $u_A = r^2 \cdot S_A / (4 \cdot T \cdot t)$

$S_A$  = coeficiente de almacenamiento durante este segmento de la curva

En las condiciones del último período la ecuación de Boulton describe el tercer segmento de la curva mediante

$$s = (Q/4 \cdot \pi \cdot T) \cdot W(u_B, r / D)$$

donde  $u_B = r^2 \cdot S_B / (4 \cdot T \cdot t)$

$S_B$  = porosidad eficaz durante el último segmento de la curva

Se puede demostrar que el coeficiente efectivo de almacenamiento es

$$S_A + S_B = \gamma \cdot S_A$$

Sin embargo, las fórmulas indicadas solamente son válidas si  $\gamma$  tiende a infinito; en la práctica eso significa que  $\gamma > 100$ . Si  $10 < \gamma < 100$ , el segundo segmento ya no es horizontal, aunque todavía el método de Boulton da una aproximación bastante buena.

Por analogía con el factor de filtración  $B$  de los acuíferos semiconfinados, a  $D$  se lo denomina factor de drenaje y viene definido por

$$D = [T/(\alpha \cdot S_B)]^{1/2}$$

A  $1/\alpha$  se le llama “índice de retraso de Boulton” y es una constante empírica. Se expresa en días y se emplea en combinación con la curva “índice de retraso de Boulton” para

determinar el tiempo  $t_{wt}$  para el cual el drenaje diferido deja de afectar al descenso del nivel de agua subterránea.

### 1.5.3. Pozo de Bombeo

En la zona inmediata al pozo de bombeo, el flujo puede dejar de seguir la ley de Darcy y tanto en el movimiento en el acuífero como en la penetración del agua al pozo se tienen *pérdidas de carga*. Esto se refleja en un descenso del agua en el pozo mayor que el descenso que teóricamente se debería observar.

#### 1.5.3.1. Origen del Descenso

El mismo se debe a varias causas:

**Pérdidas en el acuífero.** Es el descenso necesario para que el agua fluya al pozo en régimen laminar según la ley de Darcy; es función del diámetro del pozo y de las características del acuífero.

**Pérdidas por no-validez de la ley de Darcy en las proximidades del pozo.** Si se supera el número de Reynolds en las proximidades del pozo, a causa de una mayor velocidad de circulación del agua, se tiene un sobredescenso que es proporcional a una cierta potencia del caudal.

**Pérdida de penetración en el pozo.** Ocasionada por la entrada del agua a través de las ranuras del filtro.

**Pérdidas ascensionales en el pozo.** Es la pérdida de carga que ocasiona el movimiento del agua desde la zona filtrante del pozo a la bomba.

**Pérdidas de entrada en la bomba.** Son las pérdidas de carga que sufre el agua al entrar en la bomba.

El descenso que se mide en el pozo es la suma de los descensos antes mencionados.

#### 1.5.3.2. Análisis del Descenso en los Pozos

Para su cálculo se aplica la fórmula propuesta por Rorabaugh, 1953 (en Custodio et al, 1976)

$$s_p = B \cdot Q + C \cdot Q^\alpha$$

donde:  $s_p$  es el descenso observado en el pozo; el término  $B \cdot Q$  expresa el descenso ocasionado por las pérdidas del acuífero (1) mientras que  $C \cdot Q^\alpha$  integra las demás causas.  $B$  es el coeficiente de pérdidas de circulación en la formación y varía con el tiempo de bombeo, mientras que  $C$  es el coeficiente de pérdidas en el pozo y no está afectado por el tiempo. El índice  $\alpha$ , puede tomar el valor de 1 o variar entre 2 y 3, llegando hasta 3,5 según Lennox, 1960. (en Custodio et al, 1976).

Anteriormente Jacob (1946-1950; en Custodio et al, 1976) había propuesto un valor de  $\alpha = 2$ , pero con la práctica se vio que no es el que más se ajusta. Por ejemplo se puede

dar el caso de que la velocidad de entrada del agua al pozo sea baja, entonces  $\alpha = 1$  y el descenso es entonces proporcional al caudal (Q), siempre que éste no sobrepase cierto valor propio de cada pozo.

Para llegar a determinar  $\alpha$ , B y C, se deben conocer los descensos para tres caudales diferentes como mínimo e incluir uno adicional, utilizado como dato de comprobación. Todos los descensos se deben referir a un mismo tiempo, por ejemplo 1 hora. Lo ideal sería determinar valores en régimen estacionario, lo cual es posible sólo en ocasiones.

Los descensos se obtienen mediante sucesivos ensayos de bombeo a caudal creciente y constante en cada intervalo de tiempo. El nivel del agua se debería dejar recuperar entre ellos pero como se demoraría el ensayo por la espera de la recuperación, se utiliza el llamado *ensayo escalonado*. En el mismo se incrementa el caudal de bombeo transcurrido cada período de observación, sin necesidad de recuperar el nivel inicial de agua.

Ya conocidos los caudales y los descensos, y en el caso de que  $\alpha = 2$ , la solución puede lograrse analíticamente utilizando un par de las ecuaciones  $s_n = B \cdot Q_n + C \cdot Q_n^2$  obtenidas y resolviendo ese sistema de dos ecuaciones, o bien gráficamente. En el método gráfico, el más usual, se dibuja  $s/Q$  en función de Q, trazándose la recta que pasa por esos puntos; la pendiente da el valor de C y la ordenada al origen el valor de B. Cualquier otro valor determinado en el ensayo, puede graficarse y verificar si se ajusta a la recta planteada.

Para el caso en el cual se deba estimar el valor de  $\alpha$ , debe plantearse y resolverse el sistema de 3 ecuaciones  $s_n = B \cdot Q_n + C \cdot Q_n^\alpha$ . Esto se puede hacer por alguno de los tres métodos disponibles expuestos en los libros de texto (por ejemplo Custodio et al, 1976) y que involucran aproximaciones sucesivas por tanteo. Como eso es una tarea lenta y engorrosa, es más práctico hacerlo mediante un programa de computadora. Si los valores de  $s/Q$  se mantienen constantes, es  $\alpha = 1$  y entonces todos los descensos observados son proporcionales a Q.

Cuando se da el caso de que Q sea muy grande o las pérdidas en el pozo son muy importantes, la ecuación toma la siguiente aproximación:  $s = C Q^\alpha$ . Si graficamos  $\log s_p$  en función de  $\log Q$ , se puede obtener una recta con un ángulo  $\beta$ , cuya tangente es igual a  $\alpha$  y corta al eje Q = 1 en  $s_p = C$ .

Todas estas ecuaciones tratan de reflejar los valores experimentales. Se sabe que  $\alpha$  varía con el caudal; en primera instancia se puede tomar  $\alpha=1$  para caudales pequeños con régimen laminar y  $\alpha=2$  cuando se incrementa el caudal y el acuífero es confinado; para el caso de un acuífero freático,  $\alpha$  puede variar entre 2 y 3, y llegar hasta 3,5.

### 1.5.3.3. Eficiencia

Debido a la presencia de las pérdidas de carga más arriba mencionadas, el caudal de los pozos siempre es menor que el teórico permitido por el acuífero. Se define entonces como eficiencia a la relación entre descensos teóricos y reales (teórico/real), siempre referidos a un mismo lapso de tiempo, por ejemplo una hora de bombeo. Otra forma de definir la eficiencia es mediante los caudales específicos, es decir el cociente entre el caudal y el descenso correspondiente:  $Q_e = (Q/s)$

$$ef = Q_{ep} / Q_{et}$$

Donde  $Q_{ep}$  = caudal específico del pozo real y  $Q_{et}$  = caudal específico máximo calculado en función de las características del acuífero y del pozo de bombeo, ambos para un mismo tiempo de referencia.

Como el descenso teórico crece con el tiempo, se tiene un incremento de la eficiencia con el tiempo de bombeo. Para su cálculo se deben conocer los valores de transmisividad y almacenamiento; si no se tienen se puede suponer que B Q es igual al descenso teórico y la ecuación queda entonces como

$$ef = B \cdot Q / (B \cdot Q + C \cdot Q^a)$$

Mientras el régimen es laminar, la eficiencia es constante; cuando se incrementa el caudal y el régimen pasa a ser turbulento, la eficiencia decrece. El caudal para el que se inicia la disminución de la eficiencia es el caudal crítico, en el cual influye el diámetro del pozo. Un pozo que en el ensayo de bombeo escalonado muestra una reducción de caudal específico no superior al 10 %, puede considerarse bien calculado y desarrollado, aunque un 20 % es todavía aceptable. Las eficiencias deben ser comparadas dentro de un mismo acuífero

## 1.6. RESERVAS Y RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

La definición y valoración de las reservas y recursos es uno de los aspectos más controvertidos de la hidrogeología, debido tanto a la imprecisión y complejidad de las definiciones como a las dificultades para asociar los distintos aspectos involucrados con las situaciones reales encontradas en la naturaleza.

Se denominan reservas en sentido amplio, a la totalidad del agua movilizable existente en un acuífero o sistema acuífero.

Deben tenerse en cuenta en este primer concepto la definición de los límites espaciales del acuífero, en especial la profundidad, basada en criterios estratigráficos y donde reviste especial importancia tanto el denominado “basamento impermeable” como el límite superior coincidente en general con el límite superior de la zona de saturación.

Al definir las reservas se debe especificar las condiciones del límite superior dando valores máximos y mínimos.

La cantidad de agua contenida es el producto del volumen considerado por la porosidad media, o más correctamente, el producto de la suma de los volúmenes de los diferentes acuíferos reconocidos por la porosidad media de cada uno de los mismos.

Al evaluar las reservas deben tenerse en cuenta las características hidrogeológicas de los diferentes materiales que forman el sistema y el factor tiempo. Las formaciones acuíferas son susceptibles de un vaciado relativamente rápido y sus reservas movilizables en tiempos breves. Es distinto el comportamiento de los acuitardos que si bien pueden presentar volúmenes de agua muy importantes, la movilización del agua contenida en ellos es muy lenta, por lo que solo se pueden considerar como reservas si se habla de tiempos largos, de muchos años.

Otro concepto a tener en cuenta es el de calidad de agua, ya que frecuentemente los acuíferos profundos y los acuitardos contienen aguas salobres o saladas y lo que en general se trata de evaluar es el agua dulce.

Las reservas anuales corresponden a la variación dentro del año y son las que aportan a los manantiales y al caudal de base de los ríos. Son variables según las condiciones hidrológicas y dependen mucho de los cambios en las condiciones climáticas. En un contexto más amplio se pueden considerar desde las reservas estacionales hasta las interanuales, que son las que constituyen las reservas reguladoras o regulatrices. Las mismas son las que se utilizan en el balance de las aguas subterráneas y se evalúan mediante el análisis de las variaciones piezométricas. Resultan tanto más confiables cuanto mayor sea el registro de observaciones disponible.

Las reservas situadas bajo el nivel mínimo de las reguladoras son las reservas seculares o pasivas, llamadas también multianuales. Una parte de ellas drenaría a los ríos si cesara la infiltración y otra permanecería almacenada fija en el terreno por quedar debajo de las cotas de drenaje natural.

Debe tenerse en cuenta que en acuíferos sometidos a explotación, las reservas se modifican, así como su distribución entre reguladoras y seculares, no solo en función del volumen anual extraído, sino también de la distribución temporal y espacial de las mismas; no existiendo un único resultado para una misma explotación global.

En acuíferos conectados a ríos y sometidos a una gran explotación la recarga inducida puede aumentar mucho las reservas reguladoras o la capacidad útil del embalse subterráneo.

Las reservas se refieren a un volumen; en cambio al hablar de recurso se designa un caudal (volumen por unidad de tiempo). Habitualmente se interpreta un caudal permanente o por lo menos de muchos años, sobre todo cuando este alcanza un estado estacionario, aparte de las irregularidades estacionales.

Muchas veces se consideran como recursos de un acuífero el caudal promedio que sale por sus desagües naturales (manantiales, ríos, etc.). Estos recursos varían a lo largo del año y están ligados a las reservas reguladoras, respondiendo a un caudal de flujo de agua subterránea. No deben ser confundidos con el caudal posible de explotación, aunque algunos autores con criterio muy conservacionista consideran que ésta es la máxima explotación permanente que puede hacerse de un acuífero.

### **1.6.1. Caudal Seguro**

El concepto de caudal seguro fue definido como “aquel caudal de extracción del acuífero que puede mantenerse permanentemente, proporcionando agua apta para consumo humano”, aunque más apropiado resulta definirlo como “el caudal medio anual extraído artificialmente del acuífero, sin que se produzcan resultados indeseables.”

Los efectos indeseables pueden ser considerados desde distintos puntos de vista a saber:

- Hidrológicos: que se exceda la recarga media anual.

- Económicos: que los niveles piezométricos descendan por debajo de la profundidad económica de bombeo.
- De calidad: que se permita la entrada de agua de mala calidad.
- Legales: que se afecten los derechos de otros usuarios.
- Agrícolas: que en los acuíferos freáticos con nivel poco profundo, este no descienda lo suficiente como para no dañar a los cultivos.
- Morfológicos / geotécnicos: que no se produzca una subsidencia del terreno con efectos adversos.

Dado que los perjuicios dependen de la variedad de acciones realizadas sobre los acuíferos y de condiciones naturales tan diversas, muchos autores han propuesto desterrar el término de caudal seguro del vocabulario hidrogeológico.

### 1.6.2. Balance Hídrico

Al estudiar hidrogeológicamente una región es necesario el conocimiento del ciclo hidrológico, orientado principalmente a evaluar las reservas fluctuantes o generatrices del agua subterránea y su déficit o incremento en función del tiempo y de los eventos naturales. A esta formulación se la conoce como balance hídrico y se expresa mediante una ecuación conocida como ecuación del balance o del equilibrio hidrológico.

El balance hídrico es la aplicación del principio de la conservación de masa a una región definida por determinadas condiciones de contorno. En esa región, que tiene un volumen conocido, durante el período de tiempo en que se realiza el balance la diferencia entre el total de entradas y salidas debe ser igual a la variación del agua almacenada.

La realización de un balance consiste en medir flujos de agua (caudales) y almacenamiento (niveles) en una región seleccionada bien delimitada y en un período de tiempo determinado. Puede ser general, que incluye aguas superficiales y subterráneas, o parcial, que se refiere sólo a aguas superficiales, aguas subterráneas, a un acuífero, al agua del suelo, a una porción del sistema, etc.

Todos los distintos términos de la ecuación deben medirse en forma independiente, pero aún así, como en toda medición física, existen errores de cierre inevitables, producto de la falta de datos suficientes o de la falta de una metodología de evaluación apropiada.

En la práctica casi siempre se dispone de pocos datos estadísticos, de períodos de observación muy cortos o de observaciones defectuosas. Por ello y aunque las fórmulas teóricas para la resolución de un balance son más extensas y complicadas, en los estudios hidrogeológicos del país se utiliza en general la denominada ecuación simplificada del balance hídrico general:

$$I = P - E_f - E_{vtr}$$

donde

$P$  = precipitación

$E_f$  = escurrimiento fluvial

Evtr = evapotranspiración real

I = infiltración

La evapotranspiración es el proceso por el cual el agua de la precipitación vuelve a la atmósfera en forma de vapor mediante la acción conjunta de la evaporación directa y de la transpiración de las plantas.

Cuando ocurre bajo condiciones óptimas de humedad del suelo, es decir con la capacidad de campo permanentemente completa, se tiene la llamada evapotranspiración potencial. Constituye por lo tanto un límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera, denominada evapotranspiración real.

La evapotranspiración potencial puede determinarse mediante métodos empíricos como ser el de Penman, Blaney-Criddle o Thornthwaite. Comúnmente se utiliza este último, aunque en climas secos se cometen errores (Custodio et al, 1976). Por ello sería recomendable usar el método de Penman para todas las regiones climáticas, pero éste requiere un mayor número de parámetros climáticos no siempre disponibles.

La evapotranspiración real puede deducirse de la potencial conociendo, además de la precipitación, la reserva de agua utilizable del suelo, generalmente estimada sobre la base de las características edáficas del área.

La unidad utilizada en general para expresar un balance es el metro cúbico o sus múltiplos, principalmente el  $\text{Hm}^3$ , aunque suele utilizarse también el volumen dividido por la superficie, o sea una altura de agua equivalente expresada en mm.

## 1.7. RELACIONES AGUA DULCE – AGUA SALADA

Cuando un acuífero descarga directamente al mar, el flujo del agua subterránea origina un estado de equilibrio entre el agua subterránea dulce procedente del continente y el agua subterránea salada del mar. Como el agua de mar es más pesada que el agua dulce, forma en el acuífero una cuña de agua salada debajo del agua dulce.

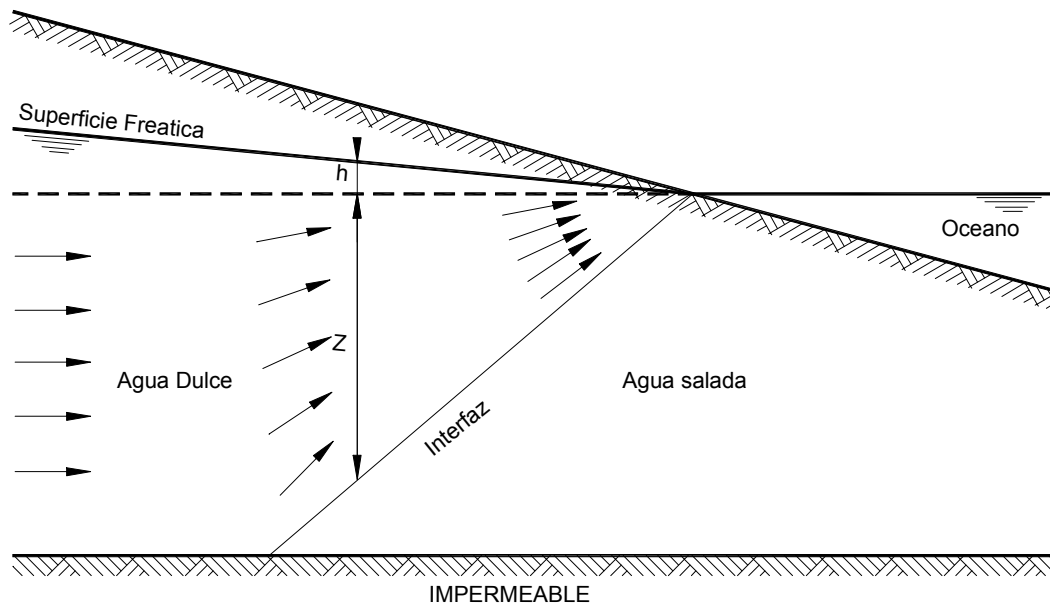
Si se supone que el agua dulce se mueve horizontalmente hacia el océano y que la interfaz agua salada - agua dulce es abrupta y que nace en la línea de costa, la presión del agua dulce en cualquier punto de la interfaz puede expresarse como  $(h + z) \cdot \rho_d$ , donde  $h$  es la altura de la superficie freática encima del nivel del mar,  $z$  es la profundidad de la interfaz debajo del nivel del mar, y  $\rho_d$  es la densidad del agua dulce (ver **Figura 6**).

Esta presión debe ser igual a la presión  $z \cdot \rho_s$  del agua salada en el otro lado de la interfaz, donde  $\rho_s$  es la densidad del agua salada. Combinando las dos expresiones y resolviendo para  $z$  se obtiene:

$$z = \rho_d \cdot h / (\rho_s - \rho_d)$$

Puesto que  $\rho_d = 1000 \text{ g/cm}^3$  y  $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$  para agua de mar, la ecuación anterior muestra que para acuíferos costeros  $z = 40h$ . Es decir, para cada metro que la superficie

freática se encuentra por encima del nivel de mar, el agua subterránea dulce se extenderá 40 m debajo del nivel del mar, donde aparecerá el agua salada.



**Figura 6.** Interfaz agua dulce – agua salada en un acuífero costero

Cuando se extrae agua subterránea de un acuífero costero, el nivel freático desciende y el agua salada subirá 40 m por cada metro de descenso de la superficie freática. Por esa razón el bombeo en un acuífero costero debe ser manejado con mucho cuidado a fin de preservar la profundidad del reservorio de agua subterránea dulce.

El cuerpo de agua subterránea dulce con forma cuña en las cercanías del mar se denomina lente de Ghyben-Herzberg, en referencia a los hidrólogos holandés y alemán, respectivamente, que en forma independiente derivaron la ecuación arriba indicada.

En realidad, las condiciones no son tan simples como las supuestas para la ecuación mencionada. Por ejemplo el agua subterránea dulce que drena al océano lo hace sobre una cierta área del fondo del mar, y no en un punto, y en el acuífero se originan componentes verticales de flujo a medida que el agua dulce se mueve hacia arriba a lo largo de la interfaz.

Tomando en cuenta estos factores, Glover (1964, en Bouwer 1978) desarrolló la siguiente ecuación aproximada para la forma de la interfaz

$$z^2 - 2 \cdot q \cdot x / [(\rho_s - \rho_d) \cdot K] - q^2 / [(\rho_s - \rho_d)^2 \cdot K^2] = 0$$

donde  $q$  = flujo en el acuífero por unidad de longitud de la línea de costa

$K$  = conductividad hidráulica del acuífero

$x, z$  = coordenadas con origen en la línea de costa

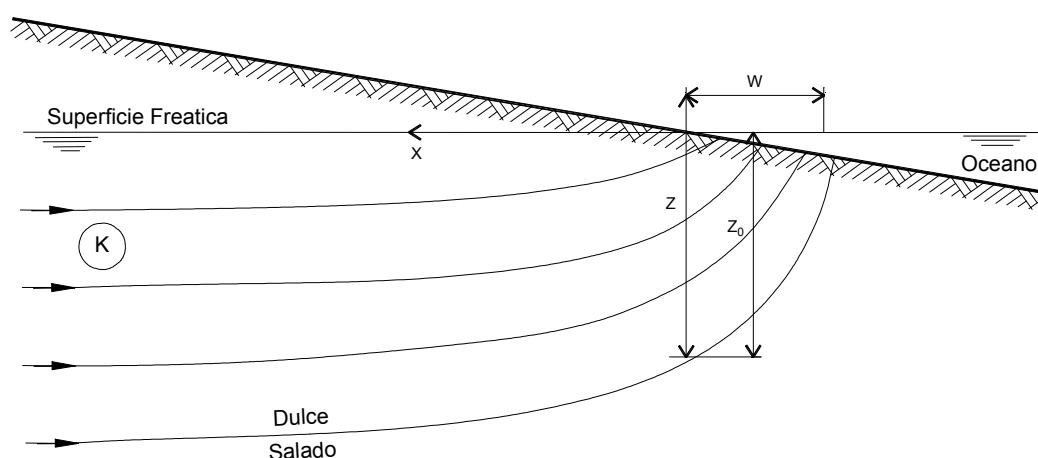
Para un acuífero de agua dulce en contacto con el agua de mar y para  $z = 0$ , el ancho de la zona a través de la cual el agua dulce entra al océano está dado por:

$$w = q / [2 \cdot (\rho_s - \rho_d) \cdot K]$$

La profundidad  $z_0$  de la interfaz debajo de la línea de costa (donde  $x=0$ ) se calcula mediante

$$z_0 = q / [(\rho_s - \rho_d) \cdot K]$$

Como puede verse en la **Figura 7**, la posición de la interfaz calculada con esta ecuación es más cercana al océano que la obtenida con la ecuación de Ghyben-Herzberg.



**Figura 7.** Solución de Glover para la interfaz agua dulce – agua salada

Los modelos matemáticos desarrollados en los últimos años permiten predecir el movimiento del frente salino en los acuíferos costeros, incluyendo acuíferos heterogéneos, dispersión de la interfaz y flujo en régimen transitorio.

### 1.7.1. Formación de Conos de Agua Salada

Cuando agua subterránea dulce yace sobre agua salada, el bombeo del agua dulce causa el ascenso de la interfaz dulce- salada debajo del pozo en forma de cono, en respuesta a la disminución de la presión en la interfaz debido a la depresión de la superficie freática alrededor del pozo.

Si el fondo del pozo se encuentra cerca del agua salada o el caudal del pozo es relativamente elevado, el cono de agua salada puede alcanzar al pozo, llevándolo a producir una mezcla de agua subterránea dulce y salada.

Si se supone un flujo horizontal estacionario del agua dulce al pozo, ausencia de movimiento lateral en el agua salada y una interfaz abrupta, la elevación  $z$  del cono debajo del centro del pozo puede ser calculada con la fórmula de Ghyben-Herzberg:

$$z = \rho_d \cdot s_p / (\rho_s - \rho_d)$$

donde  $s_p$  = depresión en el pozo.

Una solución más rigurosa en régimen transitorio desarrollada por Bear y Dagan (1968, en Custodio et al 1976), permite calcular la elevación del centro del cono debajo del pozo en cualquier momento después de iniciado el bombeo.

Cuando el tiempo es infinito, esa ecuación se convierte en

$$z_i = \rho_d \cdot Q / [2 \cdot (\rho_s - \rho_d) \cdot K_x \cdot L]$$

Donde  $z_i$  = la altura máxima de equilibrio del cono de agua salada

$Q$  = caudal de bombeo

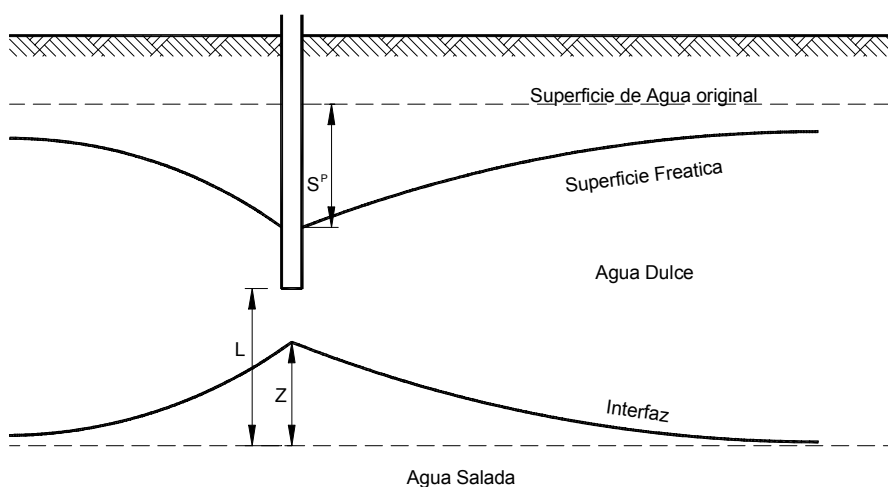
$K_x$  = conductividad hidráulica horizontal del acuífero

$L$  = profundidad de la interfaz debajo del fondo del pozo antes del bombeo

Valores calculados con esta ecuación concuerdan con mediciones experimentales hasta una altura crítica del cono, la cual generalmente se encuentra entre  $0.4L$  y  $0.6L$  (Schmorak y Mercado, 1969 en Bouwer 1978).

Cuando la altura del cono exhibía este valor crítico, la relación entre  $z$  y  $Q$  dejaba de ser lineal y en algunos casos el cono alcanzaba el fondo del pozo con un repentino salto, indicando condiciones de inestabilidad.

El agua salada que entonces entraba al pozo aumentaba la salinidad del agua bombeada a un valor del 5 al 8 % de la salinidad del agua salada.



**Figura 8.** Cono de agua salada debajo de un pozo de bombeo

## 2. EXPLORACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se entiende por tal, al conjunto de operaciones o trabajos que permiten la localización de acuíferos de los que se puede obtener agua en cantidad y calidad adecuada para el fin que se pretende. Por lo general suelen ser más complejas y costosas que las relacionadas a un proyecto de aguas superficiales, aunque al momento de explotarlas presentan una alternativa de menor costo.

La Hidrogeología es una ciencia interdisciplinaria y por ende, sus métodos de trabajo hacen uso de múltiples técnicas.

### 2.1. MÉTODOS GEOLÓGICOS

Esta metodología utiliza los *mapas topográficos y geológicos y las fotografías aéreas e imágenes satelitales* como material básico para el planteo preliminar de la localización del recurso y posibles inferencias acerca del movimiento del agua subterránea.

La *cartografía geológica de superficie* brinda información sobre la composición litológica de las formaciones y las características estructurales de los afloramientos. Con frecuencia se preparan mapas geológicos interpretados desde un punto de vista hidrogeológico, que identifican y separan formaciones permeables, de otras poco o muy poco permeables, por lo cual, con mayor o menor precisión, se han dado límites a las principales unidades hidrogeológicas, como por ejemplo: llanuras aluviales, cuencas sedimentarias detríticas, formaciones permeables de caliza o areniscas, etc. En ellos la litología es el punto más importante a considerar ya que cada tipo de roca tiene una porosidad y permeabilidad características, limitando de esta forma la prospección sólo a zonas específicas.

En primer lugar se deben cartografiar las distintas unidades litológicas, prestando especial atención a sus propiedades como acuíferos. Por ejemplo: unidades litológicas tales como granitos, gneisses, gabros y dioritas pueden agruparse, mientras que otros depósitos, gravas, arenas y arcillas que forman una única unidad geológica deben ser separados y con detalle. En ellos la porosidad en cierto grado refleja la cantidad de agua que puede almacenar el acuífero, mientras que la permeabilidad condiciona la facilidad con que pueda extraerse. Como ejemplo orientativo se plantea el siguiente esquema:

Permeabilidad Mayor	Porosidad Mayor
Gravas (bien seleccionadas)	arcillas blandas
Basalto diaclasado	limos
caliza carstificada	tobas
arena (bien seleccionadas)	arenas (bien seleccionadas)
arena y grava (mal seleccionadas)	arenas y gravas (mal seleccionadas)
rocas cristalinas fracturadas	areniscas
limos y tobas	basalto poroso
arcillas	caliza carstificada
rocas cristalinas masivas	roca cristalina fracturada
	roca cristalina masiva
Permeabilidad Menor	Porosidad Menor

Definir la estratigrafía dentro de secuencias silicoclásticas sedimentarias de interés, conduce a delimitar la posición y el espesor de los niveles acuíferos a estudiar, así como la existencia o no de capas confinantes y su continuidad. La porosidad total en estas sedimentitas es influenciada por el grado de uniformidad granulométrica, la forma de las partículas, su empaquetamiento, diagénesis, el grado de consolidación y soterramiento (todos parámetros a tener en cuenta).

El estudio tectónico del área contribuye a facilitarnos el seguimiento del horizonte acuífero, su desplazamiento y fracturación.

Es importante también analizar el origen de los depósitos (fluvial, eólico, glacifluvial, etc.), los ambientes sedimentarios y su edad. En cuanto a este último parámetro debemos considerar de interés principalmente los depósitos del Terciario y Cuaternario, que son los menos consolidados y en consecuencia más porosos y permeables.

Los perfiles geológicos del subsuelo que suelen acompañar la cartografía, facilitan la visión adecuada de la geometría y acuíferos; permiten deducir el tipo posible de acuífero, posible volumen de agua almacenada y la ubicación de futuras perforaciones en secciones de máxima potencia y transmisividad. Generalmente de esta columna estratigráfica, los primeros centenares de metros suelen ser de interés, pues en las zonas más profundas las aguas suelen estar excesivamente cargadas de sales y la porosidad y permeabilidad del medio disminuyen apreciablemente.

La *interpretación de las fotografías aéreas* se define como el examen de imágenes fotográficas con el propósito de identificar objetos y rasgos geológicos y juzgar su significado. Su interpretación constituye un excelente mapa base para los trabajos de campo. El primer paso en la interpretación es la fase de observación, división y clasificación de las formas del relieve del terreno sobre las bases de expresión topográfica, cambios de tono y textura.

Estas formas del relieve representan unidades morfológicas, por ejemplo: valles, sectores de llanura aluvial, áreas inundables, niveles de terrazas y albardones, conos de deyección y bajadas, áreas volcánicas y sus coladas, sectores medanosos, áreas cársticas, áreas de afloramiento rocoso, etc. Se pueden separar áreas de diferente vegetación y usos del suelo, discriminar materiales consolidados de los no consolidados.

Esta última referencia está fundada en que los terrenos no consolidados son los que se perforan y excavan con mayor facilidad, por lo que su exploración mecánica suele ser más rápida y poco costosa. También estos terrenos rellenan fondos de valles donde los niveles freáticos suelen estar próximos a superficie y por ende la elevación por bombeo será mínima. Poseen un coeficiente de almacenamiento y permeabilidad superior a los restantes materiales geológicos.

El reconocimiento de las formas del relieve y el conocimiento de los procesos que han permitido su desarrollo, posibilitan al intérprete esbozar conclusiones preliminares acerca de la existencia de acuíferos potenciales y sobre la calidad de las aguas.

Las fotos aéreas también brindan información sobre la red de drenaje superficial. La misma es sensible a los cambios litológicos, grados de meteorización, estructuras y textura de las rocas. La densidad de drenaje es indicativa de la resistencia y permeabilidad; un diseño de drenaje de textura gruesa sugiere un material relativamente resistente y permeable, mientras que la textura fina, un material suave e impermeable, es decir, areniscas frente a pelitas.

Se estudian las características estructurales más relevantes como buzamiento de estratos, fallas que den lugar a barreras o límites semipermeables que aíslen unidades hidrogeológicas, ya sea por su particular composición milonítica o porque ponen en contacto diferentes litologías.

La fotografía aérea proporciona el mejor análisis espacial, pero con respecto a algunos temas tiene la desventaja que es el producto de un único registro, dando una impresión estática de procesos dinámicos. La observación mediante Imágenes Satelitales compensa este inconveniente, gracias a la posibilidad de un registro secuencial que permite una observación de los cambios estacionales en la región; esta visión sinóptica es valiosa para reconocer los rasgos a gran escala.

No se debe olvidar que todas estas metodologías de estudio en gabinete, requieren un adecuado control posterior en el terreno.

## **2.2. ESTUDIOS CLIMATOLÓGICOS**

Tienen por objeto caracterizar factores cuantitativamente importantes dentro del balance hídrico de la zona a estudiar, tales como precipitación (P), evapotranspiración (Evt) y variaciones de la reserva de agua en el suelo ( $\Delta R$ ).

Generalmente se cuenta con la información de una serie de datos meteorológicos que aportan las estaciones climatológicas. También puede ocurrir que deba manejarse una red propia de observación que proporcione datos suficientes como para evitar extrapolaciones incorrectas o formulaciones empíricas que se alejen de las condiciones naturales que correspondan.

Se utilizan las mediciones de temperatura y precipitación para aplicar los métodos empíricos y semiempíricos de determinación de la Evt potencial y real. Los mismos son aplicables siempre y cuando se cumplan condiciones análogas a las cuales fueron deducidos. De ellos (Métodos de Thornthwaite, Blaney-Criddle, Penman, Turc, etc.) sólo es valioso el dato que refleje fielmente las condiciones naturales, por lo cual será necesario contrastarlo con medidas directas en la zona de estudio. Sin este requisito, sólo es un valor orientativo de la Evt.

Como se ha comprobado en diversos estudios, generalmente Turc ha dado valores más altos que las medidas directas; por el contrario Thornthwaite en zonas áridas y semiáridas ha resultado algo bajo; Blaney-Criddle, como tiene en cuenta el tipo de cultivo, puede dar aproximaciones buenas en zonas cultivadas y el método semiempírico de Penman ha dado resultados muy satisfactorios en numerosos lugares, a pesar del mayor requerimiento de datos de entrada. Es corriente que los datos climáticos disponibles en una zona permitan únicamente realizar una estimación de la Evt potencial, aplicando las fórmulas anteriores.

Para el cálculo del balance hídrico, dentro de un determinado intervalo de tiempo, puede plantearse una ecuación general:

$$P = Evt_{\text{real}} + Exc + \Delta R$$

donde (P) es precipitación; ( $E_{vt \text{ real}}$ ) es evapotranspiración real; (Exc) excedentes de agua (escorrentía superficial + infiltración) y ( $\Delta R$ ) es la variación de la reserva de agua utilizable en el suelo. El planteo de este tipo de cierre global brinda información inherente a la recarga de los acuíferos (infiltración).

## 2.3. MÉTODOS HIDROLÓGICOS

Los métodos hidrológicos de prospección deben ser tenidos en cuenta cuando las características del área impliquen conocer el agua superficial como ríos, lagos, bañados, etc. Existe una importante conexión hidráulica entre el agua superficial y la subterránea cuando esta es freática.

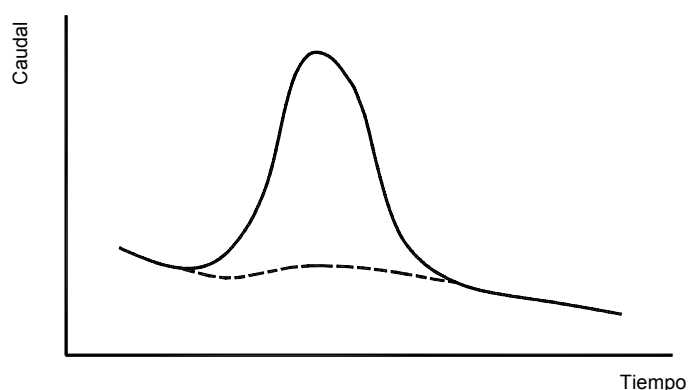
El comportamiento de un río a lo largo de su curso, puede ser influente o efluente, entendiéndose por influente, al curso que pierde agua al subsuelo y efluente, aquel alimentado por un acuífero. Este análisis de su comportamiento permite conocer su vinculación e interrelación con la geología circunvecina, ya que si no recibe o aporta agua al subsuelo, su tránsito es a través de formaciones consideradas impermeables o bien existe un cuasiequilibrio hidrodinámico entre los dos recursos.

Con estos métodos se identifican principalmente, el tipo de curso y su caudal, a efectos de definir su régimen. Se utiliza en este caso una estación de aforo, donde se mide el régimen de un río a través del conocimiento de sus caudales; se suele utilizar una variable auxiliar que simplifica la cuantificación del caudal en función de la altura del pelo de agua del río.

Lo que aporta una cuenca a través de sus cauces, se representa comúnmente en forma de *hidrograma*. El hidrograma es una curva que representa las variaciones, en función del tiempo, del caudal de un río en una sección dada del mismo y puede ser considerado como una expresión integral de las características físicas y climáticas que gobiernan las relaciones entre precipitación y escorrentía en una cuenca determinada. En el mismo es útil reconocer las proporciones de los diferentes aportes para evaluar tanto la parte del recurso subterráneo que se pierde o gana en la interrelación, como la correspondiente al escurrimiento superficial, útil para resolver la ecuación del balance hídrico. En el caso de un río que posea un tiempo de descarga muy amplio, los caudales que por él circulan al cabo de un tiempo son el resultado de la acumulación de la escorrentía superficial con la aportación subterránea.

El hidrograma que se registra de las observaciones en las estaciones de aforo, puede adoptar la forma de la figura, donde los principales términos a diferenciar son la *escorrentía directa* y las *aportaciones subterráneas*. Dentro del primer término quedan generalmente involucradas, para mayor simplicidad, las precipitaciones directas sobre el cauce, la escorrentía superficial y la hipodérmica y el segundo término puede ser definido también como caudal base.

La escorrentía superficial es la que alcanza los cauces habiendo circulado siempre por la superficie del terreno, mientras que la escorrentía hipodérmica, es aquella que procede de la infiltración que no alcanza la zona saturada regional, sino sólo la zona saturada de acuíferos colgados próximos a la superficie y que por lo tanto, emerge a la superficie con mayor rapidez que el flujo subterráneo normal.



**Figura 9.** Hidrograma

Queda por último la escorrentía subterránea, que se define como el aporte que alcanza el cauce del río procedente de las emergencias de un acuífero. Hay numerosos métodos para separar los componentes del hidrograma, siendo en general procedimientos bastante complejos y/o arbitrarios debido a la diversidad de formas aceptables.

## 2.4. MÉTODOS HIDROQUÍMICOS

Por un lado conducen a establecer la calidad del agua subterránea, para luego determinar su utilidad y por otro ayudan a conocer el funcionamiento del sistema acuífero. Generalmente el parámetro de calidad es tan importante como el de cantidad, por ello se encara este estudio junto con los anteriores.

Las características físicas y químicas de las aguas subterráneas a analizar dependen de varios factores, entre ellos: el climático, geológico y la acción antrópica contaminante. En condiciones naturales, los contenidos salinos más bajos y la menor variación de los mismos se observa en los materiales no consolidados de composición silicoclástica y de buena permeabilidad.

Un correcto planteo de su estudio implica el *muestreo sistemático* del recurso subterráneo y superficial. Esta variable (la composición química) se debe conocer arealmente estableciendo una red de muestreo que depende de la complejidad del medio acuífero analizado, de las condiciones hidrodinámicas, de la recarga y de los estudios o trabajos previos en la zona que se presentan como antecedentes.

En ocasiones basta una muestra cada 10 Km<sup>2</sup> y en otros casos una muestra cada 1 Km<sup>2</sup> puede ser notablemente insuficiente. Cada acuífero debe ser analizado químicamente en forma independiente, para luego llegar a conclusiones que los relacionen o no.

Es frecuente que en un mismo acuífero se presente *heterogeneidad química lateral* debida a variaciones en las condiciones de recarga y/o de explotación, a cambios en la geología, mezclas de agua de diversos orígenes y a tiempos de permanencia variables en función de la permeabilidad del medio, del gradiente hidráulico y de la distancia al área de recarga.

También es frecuente encontrar variaciones químicas verticales denominadas *estratificación química*; es válida la explicación anterior para su origen, siendo la causa más frecuente la variación vertical de la permeabilidad por estratificación geológica o el creciente tiempo de permanencia del agua al aumentar la profundidad. Es común en acuíferos homogéneos y potentes que la salinidad aumente con relación a la profundidad dentro del mismo.

Los análisis químicos tienen formas y contenidos muy diversos. Así el llamado *análisis químico completo* de un agua comprende la determinación de conductividad, residuo seco, dureza, pH,  $\text{HCO}_3^-$  o alcalinidad,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y si es conveniente se añaden otros iones que se encuentran en concentración notablemente más pequeña, denominados minoritarios y elementos traza.

El manejo y estudio de la química de acuíferos puede facilitarse con el empleo de diagramas y gráficos como ser los de Schoeller, Piper y Stiff y sus modificaciones, en especial cuando se trata de realizar comparaciones entre análisis o niveles acuíferos. También es útil la elaboración de *mapas hidrogeoquímicos* donde se representen las variaciones de concentración iónica y/o de relaciones iónicas. En ellos, si se relacionan puntos de agua de un mismo acuífero y si la densidad de muestreo es suficiente, se pueden trazar isolíneas (por ejemplo de salinidad total, concentración de aniones y cationes, relación sodio/calcio, etc.), que darán una idea de las condiciones hidroquímicas del medio.

## 2.5. INVENTARIO HIDROGEOLÓGICO

Antes de programar y ejecutar tareas más complejas y costosas de la exploración de agua subterránea, resulta imprescindible disponer de un conocimiento hidrogeológico previo de la región y avanzar luego en aproximaciones sucesivas. Para ello es necesario realizar una serie de investigaciones iniciales referidas a datos existentes, tanto documentales como de obras. El conjunto de estas actividades recibe la denominación de inventario hidrogeológico. Las tareas a realizar se dividen básicamente en dos tipos:

- Recopilación y análisis de antecedentes.
- Censo de pozos y perforaciones.

### 2.5.1. Recopilación y Análisis de Antecedentes

Consiste en recolectar la información existente en archivos, tanto de organismos públicos como de empresas privadas (principalmente de perforación). Si bien es cierto que cuanto mayor sea la cantidad de datos más precisos serán los resultados, el éxito también depende mucho de la claridad de objetivos perseguidos y de la idoneidad de quién colecta los datos.

En líneas generales los antecedentes documentados de interés comprenden los siguientes:

- Cartografía y fotografías aéreas y/o imágenes satelitales.

- Estudios hidrogeológicos y geológicos, generales y/o de detalle.
- Datos geológicos e hidrogeológicos.
- Perforaciones documentadas (perfiles).
- Datos climatológicos e hidrológicos.
- Análisis químicos de aguas subterráneas y superficiales.
- Datos antropogénicos.
- Bibliografía.

Una vez recolectada la información, es necesario analizarla y procesarla. Del informe elaborado surgirá un modelo conceptual preliminar de las condiciones hidrogeológicas de la región y la inserción en ella de la zona de estudio. Con esa hipótesis inicial podrá desarrollarse la metodología a utilizar en los pasos siguientes.

### **2.5.2. Censo de Pozos y Perforaciones**

Es el método básico de exploración que permite obtener un cúmulo de datos necesarios para construir cartas y mapas temáticos que conforman la síntesis fundamental de los conocimientos hidrogeológicos. Consiste en una visita a la zona de estudio y la recolección de datos de campo de las obras de captación no documentadas, su ubicación cartográfica y morfológica, relación con cuerpos de agua superficial y el volcado en planillas específicas de los siguientes datos mínimos:

- Fecha.
- Ubicación
- Tipo de captación (cavado, perforado, laguna, etc.).
- Cota del terreno y de la boca de pozo.
- Relieve.
- Nivel del agua.
- Profundidad de la captación.
- Temperatura y conductividad eléctrica del agua.
- Acuífero captado.
- Entubamientos, filtros, etc.
- Tipo de bomba.
- Uso.
- Caudal de explotación.
- Propietario.

- Perforista.

Los datos pueden constituir información primaria en los casos en que las mediciones y/o muestreos son efectivamente realizados, o información secundaria cuando provienen de información de terceros, generalmente de los dueños y a causa de problemas de acceso a las captaciones.

Si el tiempo de trabajo del censo es prolongado, es conveniente la elección de puntos estratégicos de mediciones periódicas del nivel de agua, para controlar así sus variaciones en el tiempo. Con ello se puede ajustar la red de flujo una vez concluido el censo y contar además con una red de control piezométrico permanente.

La densidad de datos depende de la escala de trabajo, de las necesidades y obviamente de la disponibilidad de obras en el área.

Es recomendable la participación de profesionales en la realización del censo, aunque sea rutinario, ya que paralelamente se llevan a cabo observaciones geológicas, morfológicas, planificación de factibilidad y, fundamentalmente, porque la elaboración del informe requiere un conocimiento de la región no transferible.

## 2.6. MÉTODOS GEOFÍSICOS

La exploración de un acuífero se realiza principalmente mediante perforaciones de prospección en la forma que se indica en el punto 2.7 del presente capítulo. Sin embargo, como las perforaciones de exploración son costosas, en general el número de las mismas es limitado y el resultado de la exploración puede no ser representativo de las condiciones del lugar; además en muchos casos examinar un sitio con el detalle adecuado requeriría un número muy grande, difícilmente alcanzable, de perforaciones. Es así que se utilizan, en primera instancia o complementariamente, métodos de prospección geofísicos.

En general los datos obtenidos de perforaciones son de tipo puntual y corresponden a profundidades discretas; la información aportada por métodos geofísicos, en cambio, refleja un volumen mucho mayor del subsuelo, produciendo una "imagen promedio" de las condiciones del mismo.

Este aspecto de las mediciones geofísicas tiene tanto ventajas como desventajas. Una ventaja es que un volumen mayor del subsuelo es representado con cada medición; una desventaja es que si un rasgo es muy pequeño puede no ser detectado en este volumen grande.

Así en la práctica se logra una compensación entre los dos métodos: por un lado la posibilidad de obtener una mejor resolución usando la investigación directa mediante perforaciones, y por otro lado los resultados más representativos provistos por las mediciones indirectas de la geofísica.

Cuando son combinados de manera adecuada, los dos métodos se complementan mutuamente para producir una provechosa investigación del subsuelo, usando los métodos geofísicos para localizar zonas favorables y desfavorables y luego concentrando las perforaciones en las áreas críticas.

Existen tres vías básicas de aplicar los métodos geofísicos de exploración, a saber:

- Aérea o satelital, cuyo mérito principal reside en la gran cobertura espacial y los costos relativamente bajos, pero tiene una pobre, casi ninguna, resolución de detalles locales.
- Los aplicados en superficie, que producen una menor cobertura espacial por unidad de tiempo pero incrementan significativamente la resolución de la información del subsuelo; una limitación inherente a todos los métodos geofísicos de superficie es que su resolución (capacidad de detectar rasgos pequeños) decrece con la profundidad.
- Los registros bajo superficie, es decir en perforaciones, mejoran enormemente la resolución vertical con respecto a los anteriores, pero el volumen abarcado es usualmente limitado al área inmediatamente alrededor de la perforación o al existente entre dos perforaciones, y el costo por unidad de superficie es alto; su mayor beneficio es que permiten obtener información detallada de alta resolución a profundidades considerables y precisas.

Las tres vías de aplicación tienen su utilidad en la exploración del subsuelo, pero la primera solamente para estudios regionales de grandes unidades y con poco detalle y por ello aquí sólo se tratarán las dos restantes.

Los métodos geofísicos de exploración se emplean tanto antes como durante la ejecución de perforaciones, a fin de obtener información sobre el carácter de las formaciones y la presencia y la salinidad del agua subterránea. La eficacia de cualquiera de los métodos, sean de superficie o de perforaciones, depende del contraste en las propiedades físicas y físico químicas del agua y de los estratos geológicos presentes.

Por ejemplo cuando sedimentos no consolidados o una serie de los mismos yace sobre una roca de basamento, normalmente existe suficiente contraste natural entre estas dos unidades, pero ocasionalmente el subsuelo puede ser tan homogéneo que muchos de los métodos geofísicos de exploración no son aplicables porque no existe suficiente contraste; sin embargo aún así la prospección ha indicado que la formación es uniforme.

El conocimiento de la composición de los sistemas acuíferos es muy útil para la interpretación de los datos geofísicos y a su vez el uso de varios métodos geofísicos puede minimizar la cantidad de perforaciones necesarias para definir las condiciones del subsuelo.

Los métodos de superficie incluyen técnicas de sísmica de reflexión y de refracción, gravimetría, magnetometría, resistividad eléctrica y electromagnética; los de profundidad, técnicas de medición del diámetro, del flujo vertical, de temperatura, resistividad, potencial espontáneo, radiación gamma, neutrones y propiedades acústicas.

Cada una de estas técnicas tiene su capacidad particular de reflejar ciertas propiedades de los acuíferos, como ser estructura, litología, salinidad, etcétera, aunque sólo algunas de ellas son de uso frecuente en hidrogeología (sobre todo en el país) y serán detalladas más adelante.

Una característica común a todos los métodos geofísicos es que la interpretación de los datos medidos requiere entrenamiento y experiencia, puesto que lo que la geofísica mide

son propiedades físicas del subsuelo (densidad, propiedades eléctricas, magnéticas, nucleares y acústicas) y nunca directamente propiedades geológicas, hidrológicas o químicas. Normalmente, mediciones en áreas nuevas deben ser correlacionadas con muestras litológicas de perforaciones cercanas antes de que puedan ser interpretadas.

Uno de los problemas frecuentemente encontrados es que las señales registradas por un instrumento geofísico no solamente consisten en las señales del acuífero o formación investigada, sino que muchas veces están afectadas por "ruidos" procedentes del operador, instrumento y/o del medio ambiente. Estos ruidos de fondo deben ser distinguidos como tales por el operador y eliminados para reconocer las reales señales geológicas.

La selección del método a ser empleado depende del tipo de información buscada, la naturaleza del material acuífero y del fluido contenido, de su aplicación en superficie o en profundidad, de si la perforación está entubada o no y del dinero disponible para la exploración geofísica.

### **2.6.1. Métodos de Superficie**

Los métodos geofísicos de superficie proveen información específica sobre la estratigrafía y la estructura de la geología local como así también sobre propiedades de los acuíferos.

Los métodos más comunes en hidrogeología son los de resistividad eléctrica y de sísmica de refracción y serán descritos más adelante. La prospección gravimétrica se ha utilizado para determinar la profundidad del basamento en depósitos aluviales y para delimitar paleocauces.

Fuertes gradientes de gravedad pueden indicar un cambio brusco en la profundidad del basamento, por ejemplo una escarpa de falla cubierta por sedimentos. Métodos gravimétricos y magnetométricos pueden ser útiles para hallar la estratigrafía de rocas consolidadas y localizar fallas.

Exploraciones magnetométricas se han empleado para estudiar acuíferos basálticos y cuencas aluviales con basamento de rocas magnéticamente susceptibles.

Siempre es recomendable, si no necesaria, la correlación de datos geofísicos con el perfil litológico de por lo menos una perforación.

#### **2.6.1.1. Resistividad Eléctrica**

Este método, ampliamente conocido como "prospección geoeléctrica", está basado en evaluar la resistividad aparente del material del subsuelo haciendo pasar una corriente eléctrica conocida y midiendo la diferencia de potencial entre dos puntos (ver **Figura 10**).

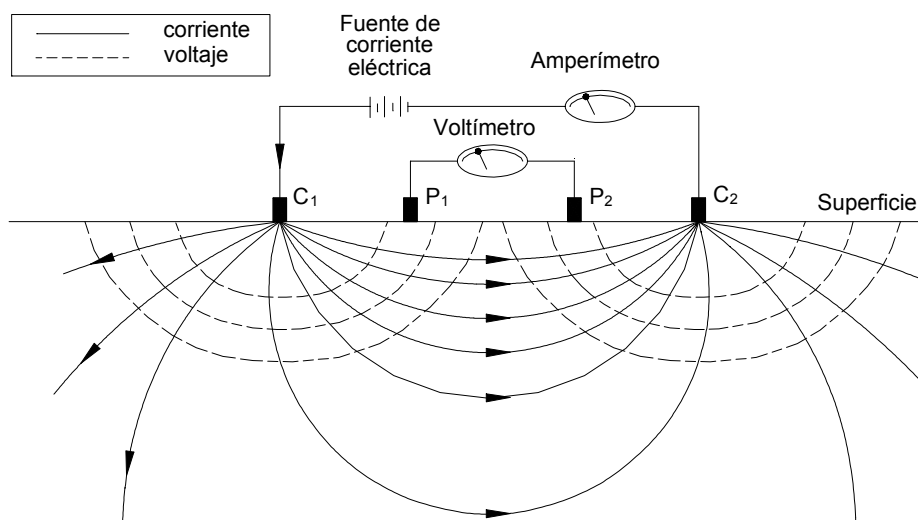
La corriente se aplica mediante estacas metálicas clavadas en el suelo, con un distanciamiento que varía desde unos pocos metros a varios cientos, dependiendo de la profundidad deseada para medir la resistividad.

Para evitar la polarización, se aplican corrientes alternas de baja frecuencia o corriente continua reversante con potenciales hasta 200 voltios. Para conseguir un buen contacto

eléctrico en suelos secos, estos pueden necesitar ser humedecidos alrededor de los electrodos de corriente.

La diferencia de potencial (voltaje) es medida con dos electrodos separados ubicados sobre una línea entre los electrodos de corriente.

Estos electrodos de potencial pueden consistir en estacas metálicas o vasos cerámicos porosos con una solución saturada de sulfato de cobre.



**Figura 10.** Dispositivo de medición geoelectrica

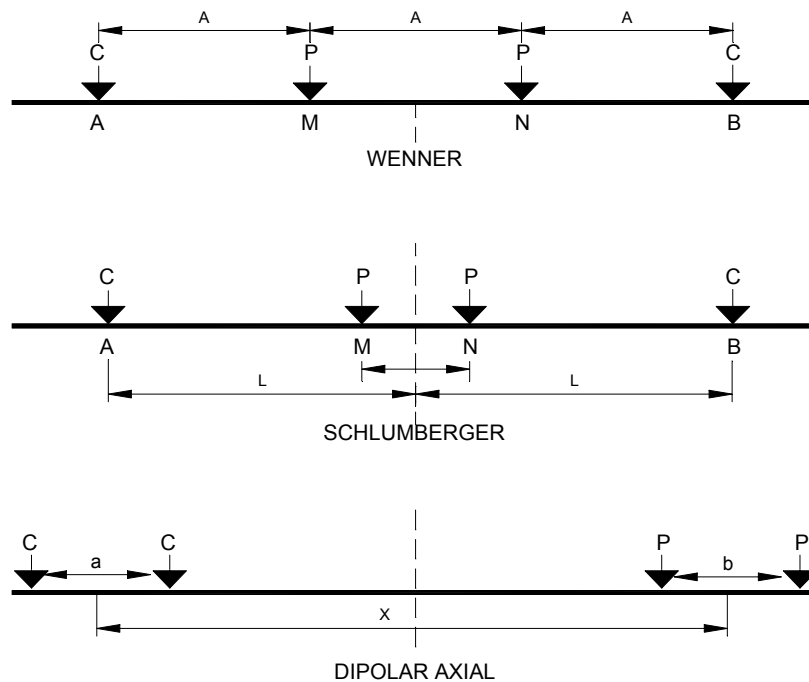
La resistividad aparente aumenta con un incremento en la porosidad del material, una disminución del contenido de agua y una disminución de la salinidad del agua contenida en la formación.

Los valores de resistividad aparente varían desde 1 ohm-m o menos para arcilla con agua salada hasta  $10^8$  ohm-m o más para rocas ígneas sólidas y cuarcitas; rocas meteorizadas presentan valores menores.

Acuíferos de arena o grava con agua dulce tienen valores de resistividad aparente entre 15 y 600 ohm-m. Los valores inferiores (15 a 20 ohm-m) son característicos de acuíferos con un contenido de sales en el agua desde algunos cientos hasta unos 1000 mg/l.

Los valores más altos, de 300 a 600 ohm-m, han sido observados en acuíferos basálticos. Valores menores de 10 ohm-m son indicativos de acuíferos con agua salada o salobre; en agua dulce la resistividad aparente es de aproximadamente 50 ohm-m y la del agua de mar menor de 1 ohm-m.

Las dos configuraciones de electrodos más usados son: la de Wenner, donde los 4 electrodos son equidistantes, y la configuración de Schlumberger, donde la distancia MN entre los electrodos de voltaje es menor que  $1/5$  de la distancia AB entre los electrodos de corriente (ver **Figura 11**).



**Figura 11.** Configuraciones de electrodos de corriente (C) y de potencial (P)

Con la primera configuración, muy usada en los Estados Unidos, se considera que la profundidad a la cual se mide la resistividad aparente es aproximadamente igual a la separación de los electrodos de corriente, aunque esto solamente es cierto si el material del subsuelo es de resistividad más o menos uniforme.

Una capa de baja resistividad relativamente cerca a la superficie tiene un efecto dominante en los valores medidos de resistividad aparente y reduce la profundidad efectiva de la prospección. La ventaja de la configuración de Schlumberger, la más usada, reside en que los electrodos de voltaje no necesitan ser trasladados cada vez que se incrementa la distancia entre los electrodos de corriente para medir a profundidades mayores.

Una prospección de resistividad puede ser ejecutada en forma de calicata o de sondeos eléctricos verticales (SEV). En la primera se utiliza una separación constante de electrodos, seleccionada para lograr una cierta profundidad deseada de prospección, y la resistividad aparente es medida en diferentes puntos para producir un mapa con líneas de iso-resistividad.

Tales mapas son útiles para detectar variaciones en la profundidad del basamento o en el espesor acuífero, discontinuidades verticales tales como fallas, cambios en la calidad del agua subterránea y en la profundidad de la interfaz agua dulce - agua salada.

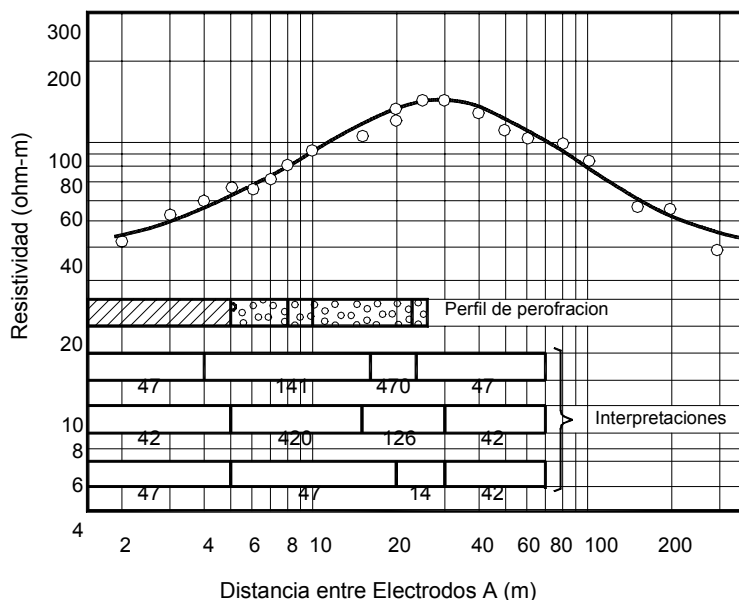
En los sondeos verticales la distancia entre los electrodos se extiende para aumentar la profundidad a la cual se mide la resistividad aparente. Graficando los valores resultantes de resistividad aparente en función del distanciamiento de los electrodos se obtiene una

curva, la cual, debidamente interpretada, proporciona información sobre los cambios de resistividad en profundidad (ver **Figura 12**).

Para esta interpretación se utilizan curvas patrones teóricas de resistividad aparente - profundidad para una variedad de sistemas de 2, 3 o 4 capas con diferentes resistividades cada una. Comparando la curva de campo de resistividad aparente con las curvas patrones se deduce entonces el espesor y la resistividad de las diferentes capas.

El resultado es más exacto para el caso de dos capas y en situaciones de capas múltiples, las numerosas incertidumbres y variables que afectan los datos de campo dificultan la obtención de una interpretación única.

Los programas de computación ofrecen un medio más efectivo de interpretación al permitir una considerable interacción. La interpretación puede mejorarse mucho disponiendo de información adicional sobre la profundidad y la litología, por ejemplo de perfiles de perforación o exploración sísmica.



**Figura 12.** Curva de un sondeo eléctrico vertical (Wenner)

El alcance máximo en profundidad de los sondeos verticales se encuentra en el orden de los 500 metros, aunque suele estar limitado a la primera capa de baja resistividad. La prospección de resistividad eléctrica proporciona información sobre la profundidad y el espesor de acuíferos, la profundidad del basamento. La presencia de fracturas o zonas meteorizadas en rocas consolidadas y la posición de la interfaz agua dulce - agua salada, aunque solamente pueden detectarse aquellas capas con suficiente espesor y un contraste adecuado en sus propiedades eléctricas.

Normalmente la profundidad de la superficie freática de acuíferos libres no puede ser hallada porque el contenido de agua de la zona vadosa es demasiado elevado como para generar una diferencia significativa entre la resistividad por encima y por debajo de la superficie freática. Con los datos interpretados de una serie de sondeos alineados se

dibujan cortes geoelectricos, mostrando la sucesión vertical y extensión lateral de capas de diferente resistividad.

La prospección geoelectrica es relativamente barata y se encuentra entre las técnicas más usadas en la exploración de agua subterránea. El método es especialmente útil si se lo combina con otros estudios como prospección sísmica, perforaciones de exploración y fotointerpretación.

La presencia de cables subterráneos, tuberías metálicas, transformadores de alta tensión, alambrados metálicos y otros elementos conductores en contacto con el suelo, produce interferencias con las mediciones y usualmente resultados erróneos en su área de influencia.

#### 2.6.1.2. Sísmica de Refracción

En hidrogeología esta técnica, basada en el análisis de los efectos de una fuente generadora de impulsos sísmicos, es usada para determinar el espesor y/o la profundidad de horizontes geológicos y el tiempo de propagación o la velocidad de las ondas sísmicas dentro de los mismos. Ejemplos de tales horizontes son el techo del basamento, capas de arcilla y la superficie freática.

Cuando en el terreno se da un golpe de maza, se produce una explosión, o en definitiva, se libera energía bruscamente generando un impulso sísmico, una parte de ella se propaga en forma de vibraciones.

Estas ondas pueden asimilarse a fenómenos oscilatorios y en ellas cabe distinguir tres tipos: longitudinales, transversales y superficiales.

Los métodos sísmicos de refracción convencionales solamente utilizan las primeras, también llamadas compresionales u ondas P; son también las primeras en llegar a los sensores lo que facilita su identificación.

Estas ondas se mueven a través de las capas del subsuelo, cuyas densidades y propiedades elásticas determinan la velocidad a la cual la onda sísmica se va a propagar a través de las mismas. La porosidad, composición mineralógica y el contenido de agua de una capa afectan tanto su densidad como su elasticidad.

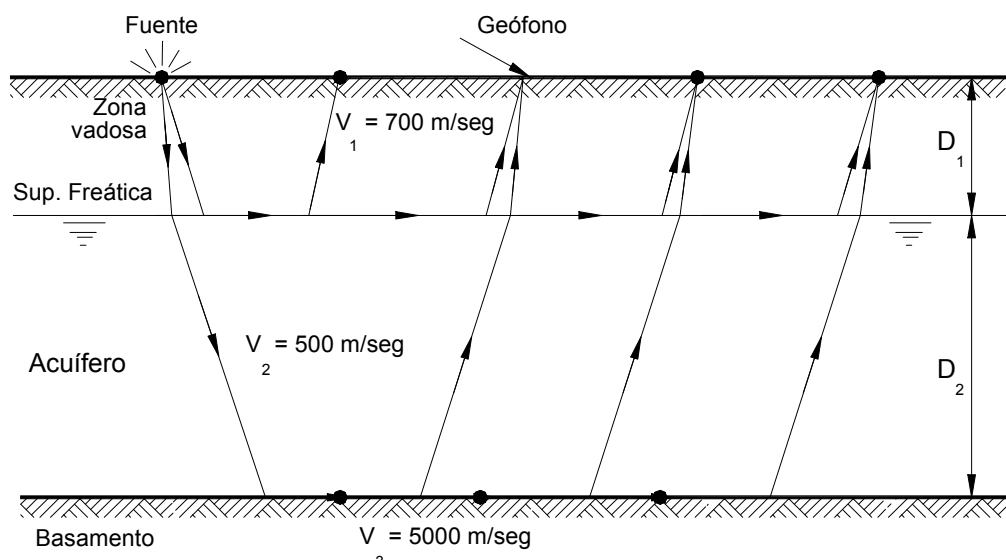
En la **Tabla 1** (de Custodio, E. y Llamas, M.R., 1976) se indican las velocidades de ondas de compresión en diferentes materiales geológicos. En la misma puede verse que las velocidades sísmicas de los diferentes tipos de material se superponen, de modo que conocer solamente la velocidad de las capas no permite definir su composición. Pero si este conocimiento es combinado con información geológica, puede ser usado en forma inteligente para identificar los estratos geológicos.

Material	Velocidades (m/seg)
Tierra vegetal	250-400
Limos y arenas muy sueltas	300-500
Arenas y gravas sueltas	400-900
Arenas y gravas sueltas saturadas	1400-1800
Agua	1400-1600
Arcillas	900-2500
Areniscas	1800-4000
Calizas	2000-6000
Granito	4500-5800
Roca metamórfica	3000-7000

**Tabla 1.** Velocidades sísmicas

Una fuente sísmica produce en el suelo ondas que viajan en todas las direcciones. La sísmica de refracción sin embargo solamente utiliza las ondas que se muestran en la **Figura 13**. Una de éstas, la onda directa, se traslada paralelamente a la superficie del terreno. Un sensor sísmico (geófono) detecta la onda directa a medida que se mueve a lo largo del horizonte superficial.

El tiempo de propagación a lo largo de este camino está relacionado a la distancia entre el sensor y la fuente sísmica y al material que compone el horizonte. Si debajo de la capa superficial existe un horizonte más denso con una velocidad más elevada, tal como el basamento, algunas de las ondas sísmicas van a ser refractadas cuando entran al mismo, semejante a la refracción de la luz cuando pasa del aire al agua.



**Figura 13.** Propagación de ondas en sísmica de refracción

Una de éstas ondas refractadas, cruzando la interfaz a un ángulo crítico, va a seguir moviéndose paralelamente al techo del basamento a la velocidad más elevada de éste, entregando continuamente por refracción energía hacia la capa superior, generando ondas que pueden entonces ser detectadas en la superficie a diferentes distancias de la fuente (ver **Figura 13**).

Más allá de cierta distancia (llamada distancia crítica), la onda refractada va a llegar al geófono antes que la onda directa. Esto ocurre aunque el camino refractado sea más largo, porque una porción suficiente del camino de la onda es recorrido en el basamento de mayor velocidad de propagación.

La medición del tiempo de esta primera llegada a los diferentes geófonos y de sus distancias de la fuente, permite calcular las velocidades de los horizontes, sus espesores y la profundidad al basamento. La aplicación de métodos sísmicos de refracción generalmente está limitada a la resolución de 3 a 4 capas.

Lo antedicho se basa en tres suposiciones fundamentales:

- 1). Las velocidades sísmicas de los horizontes geológicos crecen con la profundidad, requerimiento que generalmente se cumple en casi todos los sitios.
- 2). Los horizontes deben tener un espesor suficiente para permitir su detección.
- 3). Las velocidades sísmicas de las capas deben ser lo suficientemente diferentes como para permitir la resolución de capas individuales.

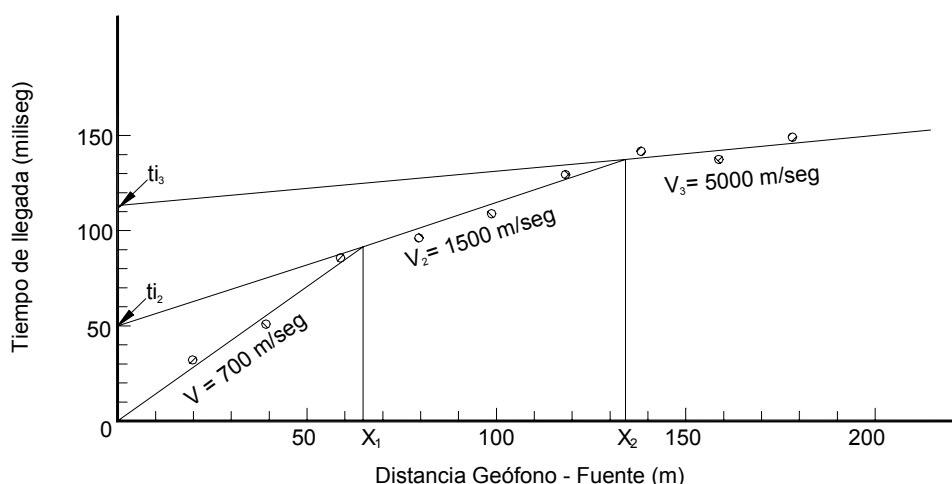
No hay forma de deducir solamente a partir de los datos sísmicos si existe una capa escondida (debido a las condiciones 1 y 2 arriba mencionadas); para ello se necesita la correlación con un perfil de perforación.

Variaciones en el espesor de las capas, heterogeneidades en un horizonte o irregularidades en el contacto entre horizontes, muchas veces producen dispersión o anomalías en los datos; por ejemplo la presencia de grandes bloques en un depósito aluvial o un basamento con superficie muy irregular.

En todos los equipos de prospección sísmica existen los siguientes elementos:

- Una fuente generadora de impulsos sísmicos, que puede ser una simple masa o pesa que golpea el suelo o, para profundidades mayores, explosivos u otros dispositivos de alta energía.
- Una serie de sensores, llamados geófonos, implantados firmemente en la superficie del suelo a varias distancias de la fuente.
- Un sismógrafo, instrumento que amplifica y registra las señales recibidas de los geófonos.

Del registro del sismógrafo se obtiene la identificación y la medición del tiempo de llegada de la primera onda. Para la interpretación, estos tiempos de llegada se grafican en función de las distancias geófono - fuente sísmica, obteniéndose una línea quebrada llamada dromocrona (ver **Figura 14**). En ésta, cada segmento indica una capa y su pendiente es inversamente proporcional a la velocidad sísmica en la misma.



**Figura 14.** Gráfico tiempo - distancia correspondiente al sistema de la Figura 13

Las velocidades, junto con las distancias críticas  $X$  o la intersección de la extensión de los segmentos con el eje de ordenadas, se utilizan para calcular la profundidad y/o el espesor de las capas individuales.

Las señales sísmicas son fuertemente afectadas por la interferencia de vibraciones del suelo de origen natural o antropogénico, tales como viento, ruido de aviones, paso de vehículos o trenes etc. y en menor grado por dispersión de origen geológico. Esta última puede complicar la interpretación de los gráficos tiempo-distancia, pero es al mismo tiempo un indicador de las condiciones locales, por ejemplo variaciones laterales en la composición y/o espesor de las capas, contenido de agua, superficie de contacto irregular entre horizontes y otros.

La prospección de prospección que puede ser alcanzada es del orden de los 100 metros, aunque también se ha logrado información de profundidades mucho mayores. El rango de profundidad se ve restringido al horizonte con la mayor velocidad de propagación (por ej. el basamento), porque la deflexión de las ondas sísmicas en este horizonte imposibilita medir las velocidades por debajo de él.

La prospección por sísmica de refracción requiere un equipo relativamente costoso y personal altamente especializado, sobre todo cuando las condiciones están lejos de las ideales, por ejemplo en presencia de formaciones inclinadas o acunadas, de un incremento lineal de la velocidad de propagación y de fallas y otras discontinuidades verticales, pero muchas veces es el único método indirecto posible para lograr la información deseada.

### 2.6.2. Registros en Perforaciones

Los registros en perforaciones, generalmente llamados perfilajes geofísicos, consisten en bajar en la perforación uno o más sensores fijados a un cable conductor y registrar sus señales a medida que son ascendidos a la superficie.

En perforaciones ejecutadas a percusión el análisis de los detritus de perforación permite obtener un perfil de una exactitud razonable. Esto no es el caso en las perforaciones ejecutadas por el método rotativo, en las cuales solamente mediante un perfilaje geofísico se logra información de precisión suficiente, con la ventaja de obtener al mismo tiempo datos adicionales muy valiosos e imposibles de conseguir por otros medios.

Las técnicas de perfilaje, desarrolladas en los años 20 por la industria petrolera, han encontrado una amplia aplicación en la investigación de agua subterránea, incluyendo registros de potencial espontáneo, resistividad, radiación gama, neutrones, temperatura y caliper. Los perfilajes de potencial espontáneo y resistividad, en conjunto llamados perfilajes eléctricos, se encuentran entre las técnicas más frecuentemente utilizadas.

Los perfilajes eléctricos solamente pueden ser realizados en perforaciones abiertas y llenas del lodo de inyección y comúnmente consisten en una curva de potencial y una o más de resistividad registradas sobre en un mismo gráfico. Sin embargo, como en agua subterránea el potencial espontáneo es de poco valor (ver más adelante), los registros más útiles son los de resistividad y radiación gama natural.

En general un equipo de perfilaje eléctrico incluye cuatro componentes principales:

- Una unidad electrónica que alimenta de corriente eléctrica a la sonda en la perforación y mide los parámetros resultantes.
- Un guinche o bobina con el cable conductor.
- Una sonda colgada del anterior, de la cual la corriente eléctrica pasa al lodo de inyección y a la formación.
- Un registrador automático para graficar en forma de curva continua los valores de resistividad o potencial en función de la profundidad.

Algunos perfiladores ejecutan simultáneamente dos o más registros vinculados, por ejemplo resistividad y potencial espontáneo, o radiación gama y resistividad de punto solo. Otros registran un parámetro por corrida, lo que permite una mayor amplitud de registro en la faja de papel facilitando el reconocimiento de detalles. También existen equipos que no grafican las señales, sino que éstas son leídas del instrumento medidor a intervalos regulares de profundidad y representadas manualmente.

**Perfiles de resistividad.** Para obtener un perfil de la resistividad aparente de las formaciones, una corriente alterna es aplicada a dos electrodos y la diferencia de potencial entre estos electrodos, u otros dos, es medida con un potenciómetro registrador; la cantidad de corriente total se mide con un amperímetro. Se utilizan varias disposiciones diferentes de electrodos, siendo la más simple la monoelectródica o de punto sólo, en la cual un electrodo de corriente es colocado en la superficie cerca de la perforación y el otro bajado a la perforación. Como ya se dijo, ésta debe estar abierta, es decir sin entubamiento, y llena del lodo de inyección o de agua. La diferencia de potencial es medida entre el electrodo de corriente en la perforación y un electrodo de potencial situado en la superficie. La resistividad medida con esta disposición corresponde principalmente a una pequeña región esférica alrededor del electrodo en la perforación y es muy afectada por la resistividad del lodo y la parte de la formación invadida por mismo. Prácticamente no permite deducir la resistividad aparente de la formación pero sí los límites de esta.

En otra disposición de electrodos, un electrodo potencial adicional es usado dentro de la perforación. Este electrodo puede estar ubicado a una distancia relativamente pequeña (16 pulgadas) por encima del electrodo de corriente (normal corta o normal 16) o a una distancia relativamente grande (64 pulgadas) por encima de dicho electrodo, llamándose entonces normal larga o normal 64.

Los registros monoelectródicos y de normal corta dan una mejor resolución de los detalles litológicos, pero el dispositivo normal corta mide la resistividad aparente de la formación inmediatamente alrededor de la perforación, la cual probablemente esté invadida por la inyección. Las normales largas tienen una mayor penetración lateral y dan un valor más preciso de la resistividad aparente de la formación, permitiendo una mejor interpretación del perfil en cuanto al tipo de roca y a la calidad del agua.

Los llamados perfiles laterales se obtienen con los dos electrodos de corriente en la perforación, separados por una distancia relativamente grande (aproximadamente 15 metros) y con los electrodos de potencial relativamente juntos a una distancia de aproximadamente 5 metros debajo del electrodo de corriente inferior. Esta disposición proporciona la mejor definición de los contactos entre unidades litológicas y el valor más representativo de su resistividad aparente, aunque algo exagerado.

La resistividad de formaciones acuíferas depende principalmente de la salinidad del agua y de la porosidad del material. La interpretación de perfiles de resistividad generalmente es más exitosa si se la hace juntamente con el perfil de potencial espontáneo, aunque cabe recordar lo expuesto más adelante con respecto a este potencial en agua subterránea.

Los valores de resistividad son más altos para rocas sólidas y densas y más bajos para arcillas y lutitas. Resistividades medias en combinación con potenciales espontáneos negativos pueden indicar arenas acuíferas. Si se conocen el material de la formación y su porosidad, la resistividad aparente medida puede proveer una estimación de la salinidad del agua subterránea, previa corrección por el diámetro de perforación, disposición de electrodos, resistividad del lodo, penetración del lodo, espesor del acuífero, temperatura y algún otro factor.

**Potencial espontáneo.** Un perfil de potencial espontáneo (usualmente llamado SP) es obtenido registrando las diferencias de voltaje que ocurren naturalmente entre un electrodo situado en la superficie cerca de la perforación y otro abajo dentro de la misma. La perforación debe estar sin entubamiento y aún llena del fluido de perforación.

A medida que la sonda con el electrodo pasa frente a diferentes formaciones se registran variaciones en la diferencia de potencial, que son debidas a efectos electroquímicos entre los diferentes estratos, a diferentes potenciales de flujo, y otros efectos electrocinéticos asociados al movimiento de agua a través de los estratos geológicos. El registro resultante proporciona una idea aproximada de la profundidad de los límites entre estratos y del tipo de material.

Cerca del borde derecho de un registro de SP se encuentra la llamada "línea de arcillas", indicando la presencia de horizontes impermeables como arcillas, lutitas y rocas compactas. Por conveniencia esa línea de arcillas representa el cero o el potencial de referencia, de manera que los registros hacia la derecha de la línea son positivos y los hacia la izquierda negativos.

El borde izquierdo de la curva se llama la "línea de arena" y representa estratos más permeables como arenas, gravas, areniscas y rocas con porosidad secundaria. La distinción cualitativa entre zonas conteniendo agua altamente mineralizada o agua dulce es un resultado importante en la interpretación de perfiles de potencial espontáneo. En una perforación llena de agua eso es posible siempre que el agua contenida en la perforación sea químicamente diferente de aquella en la zona acuífera, lo cual muy frecuentemente no es el caso.

Las suposiciones involucradas en una interpretación cuantitativa del SP pocas veces se cumplen en los estudios de agua subterránea y su aplicación suele llevar a errores.

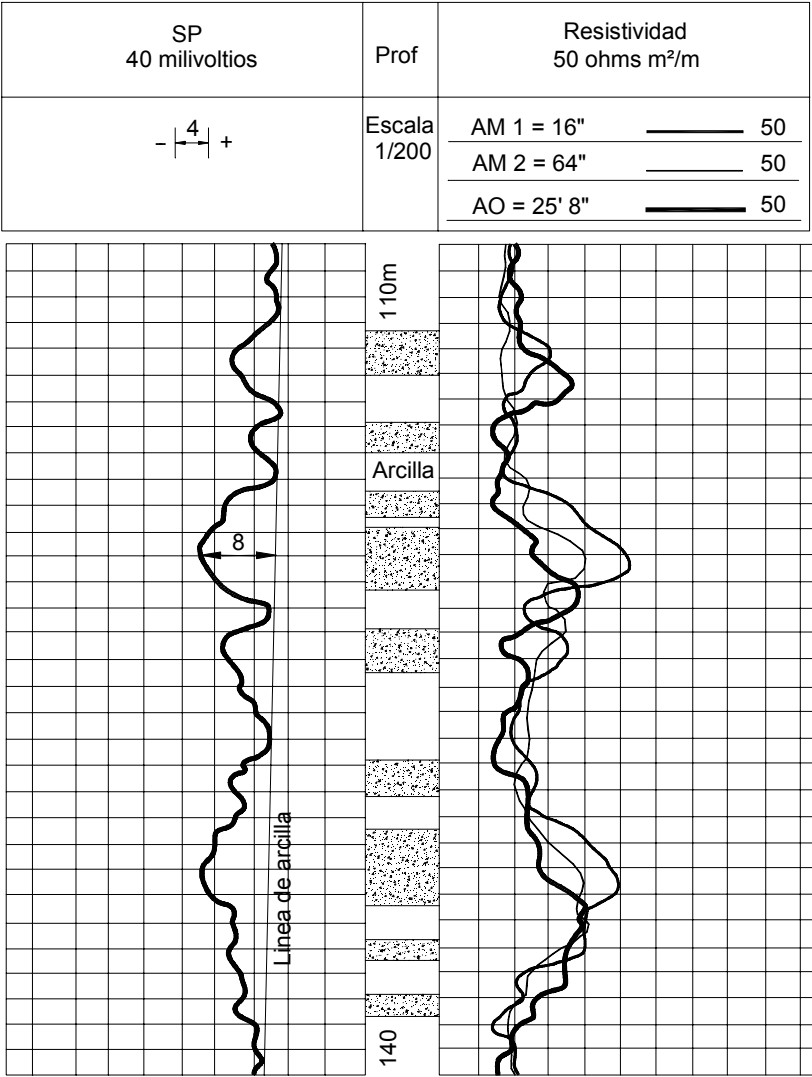


Figura 15. Perfilaje de potencial espontáneo y resistividad

**Radiación gama natural.** Los perfiles de la emisión natural de radiación gama de los diferentes estratos se obtienen introduciendo en la perforación un detector de rayos gama y registrando su señal de salida (cuentas por segundo). Puesto que la radiación gama

pasa a través de metales, esta técnica también puede ser usada en perforaciones entubadas, llenas o vacías de fluido. Arcillas y lutitas contienen mucho más elementos emisores de radiación ( $K^{40}$  y productos derivados de uranio y torio por ejemplo) que calizas y arenas.

Los granitos emiten radiación gama a un nivel moderado de intensidad, mientras que algunos materiales volcánicos, por ejemplo tobas, pueden presentar una radiación considerable. Los perfilajes de radiación gama natural se utilizan principalmente para distinguir entre materiales con y sin arcilla, mejorando así considerablemente la interpretación de los perfilajes eléctricos.

## **2.7. PERFORACIONES DE ESTUDIO**

Las perforaciones de estudio tienen por objetivo complementar las tareas de exploración anteriores, con campañas de perforaciones convenientemente distribuidas, agregando una serie de conocimientos sobre el subsuelo necesarios para lograr un resultado eficaz en la ubicación, diseño y construcción de pozos explotables. Constituyen la única manera de obtener datos concretos y precisos sobre la geología y el agua subterránea.

La cantidad relativa de tiempo y esfuerzo a invertir en prospección geofísica o perforaciones de estudio depende de la situación hidrogeológica, de la información necesitada y los costos. Donde la profundidad del agua subterránea, el material consolidado o ambos hacen las perforaciones relativamente costosas, puede ser conveniente extender al máximo la prospección geofísica antes de decidir las perforaciones. Donde por el contrario el agua subterránea se encuentra relativamente cerca de la superficie y/o los materiales no son consolidados, las perforaciones son relativamente económicas y puede resultar más ventajoso hacer un mínimo de geofísica y basar la exploración más en perforaciones.

Las perforaciones, adecuadamente revestidas y ubicadas pueden ser utilizadas para ensayos de permeabilidad, como piezómetros y/o como pozos de observación en los ensayos de bombeo, o también, según el caso, ser posteriormente convertidas en perforaciones de producción mediante ensanche y entubado.

Las perforaciones de estudio generalmente son de diámetro pequeño, menos de 150 mm, pero en estudios locales, como son los de fuentes subterráneas para abastecimiento, interesan además diámetros mayores, de 250 mm o más, que permitan la realización de ensayos de bombeo convencionales.

En general la información a ser proporcionada por el conjunto de perforaciones de estudio de un proyecto es la siguiente:

- Perfil geológico, con la profundidad y la litología de los estratos atravesados y en medios acuíferos no consolidados como arenas y gravas, la granulometría para estimar la permeabilidad y efectuar el cálculo de filtros y prefiltros de grava de los pozos de explotación. Además, el establecimiento de la serie estratigráfica puede ser de interés para la programación del estudio, sobre todo en cuanto a la profundidad a investigar.
- Nivel piezométrico de los horizontes acuíferos de interés, los que además del acuífero a explotar pueden comprender a otros vinculados al mismo.

- Calidad química del agua subterránea: imprescindible para determinar el uso del agua y los materiales requeridos para las perforaciones. Debe tenerse en cuenta la salinidad, límites de potabilidad química y bacteriológica, carácter corrosivo o incrustante, eventual contaminación y todo otro dato que permita planificar las perforaciones futuras de producción. En acuíferos costeros y lentes de agua dulce, la variación en profundidad de la calidad química del agua es utilizada para determinar la posición de la interfaz agua dulce-agua salada.
- Parámetros hidráulicos: se determina mediante ensayos de acuífero convencionales en el (los) horizonte(s) de interés; si las condiciones lo requieren, las variaciones de permeabilidad pueden hallarse mediante los correspondientes ensayos en sondeos de pequeño diámetro (Lefranc, Gilg-Gavard, Bouwer, etc.).

### 2.7.1. Métodos de Perforación

Para las perforaciones de estudio puede emplearse cualquiera de los métodos conocidos para la construcción de pozos de agua. Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes y ninguno es aplicable a todas las situaciones. La elección del método a utilizar dependerá del tipo de terreno a atravesar, de la precisión e información requerida, del tipo de maquinaria disponible y del arte e idoneidad del responsable técnico.

De todas maneras, los más utilizados son el de rotación y el de percusión a cable, aunque en el país este último está cayendo en desuso; a continuación se describen sus respectivas conveniencias y desventajas, como así también las de otros dos métodos, poco usados en el país, pero considerados de mucha utilidad para ciertas condiciones especiales.

**Método de rotación.** Es hoy en día el más utilizado, principalmente por su rapidez y la facilidad de conseguir piezas y herramientas a partir de la industria petrolera; ofrece además la posibilidad muy importante de efectuar perfilajes geofísicos con su aporte de valiosa información.

Entre los inconvenientes puede mencionarse:

- Los materiales no consolidados, permeables a muy permeables, son difíciles de atravesar si no se lleva un control adecuado del lodo de inyección.
- Los mismos problemas aparecen en terrenos fisurados si no se logra reducir la pérdida de lodo.
- Hay dificultades en perforar rocas duras, sobre todo a poca profundidad, y materiales sueltos heterogéneos, como ser arenas con rodados.
- Es difícil, si no imposible, obtener muestras litológicas representativas en materiales no consolidados (arenas, gravas).
- La toma de muestras de agua solamente es posible después del entubamiento y limpieza.
- Lo mismo ocurre con la medición de niveles piezométricos.
- El lodo de perforación invade las formaciones acuíferas dificultando su limpieza posterior.

- El lodo llega a enmascarar formaciones permeables, dependiendo su identificación del perfilaje geofísico.

**Método de percusión a cable.** Es una técnica más sencilla, requiriendo menos personal especializado, y provee una serie importante de datos hidrogeológicos durante la perforación.

Como ventajas pueden mencionarse:

- Facilidad de diámetros grandes.
- Pocos problemas en perforar materiales sueltos heterogéneos, como ser arenas con rodados, salvo que éstos sean muy grandes en relación al diámetro de perforación.
- Obtención de muestras representativas en materiales no consolidados, utilizando cucharas normales y de pistón.
- Posibilidad de entubamiento simultáneo y telescópico, lo que permite ensayar y muestrear las diferentes capas permeables que se vayan perforando.
- Se trabaja sin lodos, evitando prácticamente la limpieza posterior.
- Los niveles piezométricos de las diferentes capas se observan bien.
- Facilidad en la localización de los horizontes acuíferos.

Entre los inconvenientes se encuentran:

- Lentitud relativamente grande, que llega a ser considerable en arcillas plásticas espesas y muy grande en rocas duras y compactas.
- Limitaciones operativas en profundidades mayores.
- Dificultades en avanzar en materiales finos muy sueltos, por ejemplo arenas movedizas.
- Solamente permite perfilajes radioactivos, como ser radiación gama natural.
- Escasa disponibilidad de equipos y operadores en el país.

**Método de hincado.** Es el método más rápido y económico para extraer muestras de agua, medir niveles piezométricos y realizar ensayos de permeabilidad, sobre todo cuando el estudio requiere una cantidad relativamente grande de estos parámetros. Tiene el inconveniente de no permitir la toma de muestras litológicas y de ser aplicable solamente hasta profundidades más bien reducidas y en terrenos blandos carentes de materiales duros como rodados o bancos de tosca.

**Método de percusión a martillo neumático.** También llamado de "martillo de fondo de pozo", es el método más indicado, muchas veces el único posible, para perforar rocas duras como basalto, granito, areniscas cuarcíticas, y, cuando es usado con el entubamiento simultáneo propio del método, también materiales sueltos de grano grueso y alto grado de heterogeneidad, como ser arenas y/o gravas con rodados o bloques.

Entre sus desventajas pueden mencionarse las siguientes:

- Limitación en el diámetro de la perforación, comúnmente no superior a 200 ó 250 mm, condicionando la construcción de pozos de bombeo para ensayo.
- Costo relativamente elevado, tanto en equipo (martillo neumático, barras de perforación, trépano y compresor) como en la operación (combustible del compresor y personal especializado).
- Algunas dificultades en atravesar materiales sueltos si no se emplea el entubado simultáneo mencionado (limita el diámetro de la perforación), por ej. horizontes piroclásticos intercalados entre basaltos.
- Reducida disponibilidad de equipos en el país.

### **2.7.2. Controles y Ensayos Durante la Perforación**

Para que la perforación de estudio produzca la información deseada, es necesario que durante su ejecución se efectúen una serie de observaciones sistemáticas, a cargo de un profesional o técnico especializado en la materia. El sistema de perforación utilizado influye en estos controles sistemáticos que deben efectuarse a medida que avanza el sondeo.

En los procedimientos rotativos debe prestarse atención a:

- Pérdidas de fluido de perforación, ya sea agua o lodo y el nivel del mismo al empezar y terminar la jornada y variaciones significativas que se produzcan en el mismo durante la perforación; son datos de interés en la ubicación de horizontes permeables.
- Toma de detritus ("cutting") con una periodicidad fijada, tomando las debidas precauciones para que la muestra sea representativa y lo menos contaminada posible por horizontes superiores a la profundidad que se está perforando; normalmente se toman muestras cada 1 a 3 m. El procedimiento recomendable consiste en elevar el varillaje y trépano unos 0,5 m sobre el fondo de la perforación, hacer circular el fluido de perforación hasta que en superficie quede libre de detritus en suspensión y luego continuar el avance, perforando el tramo del cual se desea obtener muestra. El detritus tardará en llegar a la boca del sondeo según sea la profundidad del mismo y la velocidad del lodo en el espacio anular. Puede calcularse la mencionada velocidad en función del caudal de la bomba de lodos, del diámetro del varillaje y de la perforación y de esa forma precisar mejor la profundidad de la que procede la muestra. El primer detritus que llega a la boca de la perforación corresponde a la fracción granulométrica más fina, por lo que deben tomarse desde el principio varios volúmenes de 15 a 20 litros de lodo, lavando y decantando posteriormente los detritus.
- El control y registro de la velocidad de avance, que permite en gran parte de los casos fijar los cambios litológicos y ayuda en la interpretación de los perfilajes geofísico.
- Si estaba prevista, la extracción de testigos a profundidades prefijadas, o cuando convenga, por ejemplo en caso de ser los detritus poco representativos o bien que se trabaje con pérdida total de fluido.

Si la perforación se realiza a percusión, los controles son en esencia los mismos, con pequeñas variaciones entre las que cabe destacar:

- Muestras de detritus a profundidades fijadas, teniendo en cuenta los cambios litológicos. En materiales bien cohesivos, después de haber limpiado la perforación, golpeando con la cuchara o trépano el fondo quedan adheridos a las respectivas herramientas trozos representativos del material que se está perforando (arcillas sobre todo).
- Muestras de arenas y gravas más representativas utilizando cucharas adecuadas, clavando la tubería de revestimiento y limpiando por el interior sin machacar las gravas con el trépano.
- Breves cuchareos en las capas acuíferas a diferentes profundidades, toma de muestras de agua y medición del nivel estático.

## 2.8. ENSAYOS DE BOMBEO

Un ensayo de bombeo puede servir para dos objetivos principales. En primer lugar, se puede hacer para determinar los parámetros hidráulicos de un acuífero, en cuyo caso se le suele llamar un *ensayo de acuífero*, ya que lo estudiado es el acuífero en sí mismo. Proporciona así la información básica necesaria para la solución de problemas regionales y locales relacionados al flujo del agua subterránea. En segundo lugar, un ensayo de bombeo puede dar información sobre el descenso del nivel de agua subterránea en el pozo de bombeo y el caudal específico del mismo, datos que pueden ser utilizados para determinar la eficiencia aproximada y el caudal óptimo de explotación, para seleccionar el tamaño de la bomba y para estudiar el costo del bombeo. A este tipo de ensayo de bombeo a veces se le llama *ensayo de pozo* ya que se estudia, más que el acuífero, el pozo, o simplemente *ensayo de bombeo*.

El principio básico de un *ensayo de acuífero* es bastante simple. De un pozo que tiene sus filtros en el acuífero a estudiar, se bombea agua durante un cierto tiempo y a un cierto caudal. En el pozo bombeado y en algunos piezómetros situados en las cercanías, se mide el efecto que el bombeo produce sobre el nivel de agua subterránea. Sustituyendo en una fórmula apropiada (ver 1.5) los valores de los descensos del nivel del agua en los piezómetros, las distancias de éstos al pozo y el caudal del bombeo, se obtienen los parámetros hidráulicos del acuífero.

Después de terminar el bombeo, los niveles de agua en el pozo de bombeo y en los de observación comenzarán a subir, en principio hasta su posición original. Estos ascensos se pueden medir y esta parte del ensayo se llama ensayo de *recuperación*.

Cuando, como muchas veces ocurre, el caudal de bombeo no ha sido bien constante, los datos del ensayo de recuperación son más fidedignos que los descensos medidos durante el período de bombeo. Lo mismo vale para el pozo de bombeo en general, donde durante la recuperación los niveles de agua ya no están perturbados por el funcionamiento de la bomba ni afectados por las pérdidas de carga adicionales.

Así los datos recogidos durante la fase de recuperación pueden ser usados para comprobar los cálculos basados en los descensos durante la fase anterior.

El procedimiento de un *ensayo de pozo* es más sencillo y económico que el ensayo de acuífero, ya que no se necesitan piezómetros. Únicamente se miden los caudales y las depresiones en el pozo de bombeo durante un *ensayo escalonado*. Debido a los altos costos de los ensayos de acuíferos, el número de éstos es siempre reducido. Cuando se necesita conocer la distribución areal de los parámetros hidráulicos del acuífero, se pueden utilizar los datos de ensayos de pozo para obtener una aproximación de algunos parámetros, siempre que se acepte un cierto, a veces apreciable, error.

En general los ensayos de bombeo, sobre todo los de acuífero, son caros y por lo tanto precisan de una prolija planificación para no cometer errores que después impidan una correcta interpretación (un hecho más frecuente de lo que se piensa).

### 2.8.1. Estudios Preliminares

El número de ensayos de bombeo a ejecutar, su ubicación y la organización general de los mismos depende del tipo de problema a resolver, de la cantidad de información que se desea y, por supuesto, de los fondos disponibles para el programa de ensayos. El problema a resolver puede ser local, por ejemplo predecir el descenso del nivel de agua que se producirá en pozos vecinos o si en un futuro se abren nuevos pozos. También puede ser un problema más regional, por ejemplo relacionado con la cantidad de agua que se puede extraer de una cuenca hidrogeológica.

Antes de ejecutar un ensayo de acuífero hay que reunir la información necesaria sobre las condiciones geológicas del subsuelo, es decir las principales propiedades del acuífero, como ser el carácter litológico, el espesor y los límites del mismo. De lo contrario es difícil establecer un modelo conceptual aproximadamente real del mismo que permita interpretar correctamente los datos del ensayo, sobre todo en presencia de las frecuentes anomalías.

Con relación a estos límites es importante conocer el carácter y el espesor de las capas que están en contacto con ellos. Prácticamente todas las fórmulas utilizadas para el análisis los ensayos de bombeo están basadas en el supuesto de que el acuífero tenga una extensión lateral infinita. Aunque estos acuíferos no existen, muchos tienen una extensión lateral que para fines prácticos se la puede considerar como infinita. Sin embargo, otros tienen una extensión limitada ya que terminan en un material impermeable. Tales límites impermeables o barreras son, por ejemplo, las laderas rocosas de un valle, una falla o, simplemente, cambios laterales en la litología del material del acuífero.

De igual importancia son los límites de recarga a lo largo de los cuales el bombeo no produce ningún descenso del nivel del agua; estos límites se presentan cuando un acuífero está libremente conectado a un río, un canal, un lago o un océano. La presencia de un límite impermeable o de recarga debe tenerse en cuenta tanto al programar el ensayo como al analizar los datos.

Además de las características geológicas y de la existencia de algún tipo de límite, también se necesita conocer la dirección del flujo del agua subterránea, los gradientes de la superficie piezométrica y el comportamiento general del nivel de agua subterránea en la región. Igualmente es importante tener una primera estimación de la permeabilidad y porosidad del acuífero a ensayar, por ejemplo sobre la base de análisis granulométricos.

En muchos estudios de agua subterránea se dispone de abundante información antes de realizar un ensayo de bombeo y por otra parte, muchos ensayos de acuíferos se han hecho con éxito en sitios donde se sabía poco sobre la geología del lugar. A veces un límite impermeable está oculto (falla cubierta) y su existencia sólo se descubre después de un cuidadoso análisis del gráfico de descensos.

Muchas veces a través del inventario hidrogeológico pueden hallarse pozos existentes que pueden ser utilizados para llevar a cabo ensayos de acuífero, reduciendo así grandemente el costo; sin embargo, estos ensayos suelen proporcionar datos de poca confianza, sea porque no se dispone de los detalles constructivos del pozo y/o éstos no responden a los requerimientos.

### **2.8.2. Elección del Lugar del Ensayo**

En ciertos casos ese lugar está predeterminado y no hay posibilidad de cambiar a otro (más apropiado), como sucede, por ejemplo, cuando se deben utilizar pozos ya existentes o cuando se piden los parámetros hidráulicos de un lugar particular. De todos modos, al seleccionar el lugar para el ensayo de acuífero se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Las condiciones hidrogeológicas no deben cambiar en distancias cortas y ser representativas de la zona de estudio.
- No debe hallarse cerca de vías férreas ni autopistas, ya que la circulación de trenes y camiones puede producir fluctuaciones medibles del nivel piezométrico de acuíferos confinados.
- El agua bombeada debe poder evacuarse de forma que no vuelva al acuífero.
- El personal y los equipos deben tener fácil acceso.
- No deben existir bombeos próximos ni otras actividades que puedan afectar el nivel del agua subterránea.

Obviamente, una elección cuidadosa del lugar del ensayo evitará muchas dificultades durante su ejecución y la evaluación de los datos obtenidos.

### **2.8.3. Características del Pozo de Bombeo**

En relación con el diseño y la construcción del pozo, se deben aplicar básicamente los mismos criterios como para un buen pozo de explotación, indicándose a continuación algunos puntos importantes.

**Diámetro.** Se debe elegir de forma que satisfaga dos requisitos:

- Alojarse a la bomba con espacio libre apropiado para su eficiente funcionamiento y la instalación de un tubo piezométrico.
- Asegurar la eficiencia hidráulica del pozo.

Cabe mencionar que el diámetro de la sección filtro puede variar sin afectar grandemente el caudal del pozo. Si se duplica su diámetro manteniendo el resto igual, sólo se incrementaría el caudal en aproximadamente un diez por ciento.

**Profundidad del pozo y longitud del filtro.** Es deseable que se llegue hasta la base del acuífero ya que así se podrá utilizar el mayor espesor posible para la colocación del filtro, obteniéndose con ello un caudal mayor y en consecuencia también un mayor descenso de la superficie piezométrica del acuífero.

Mientras, como ya se ha mencionado, el diámetro del filtro es poco relevante, la longitud del mismo es muy significativa. La regla general es que debe corresponder por lo menos al 70-80% del espesor del acuífero ya que esto permite obtener un 90% o más del máximo rendimiento que se obtendría si el filtro abarcara todo el acuífero.

Otra gran ventaja de la longitud citada es que el flujo de agua en el acuífero hacia el pozo de bombeo es prácticamente horizontal, uno de los supuestos en el que se basan casi todas las fórmulas de los ensayos de bombeo, no necesitándose entonces hacer ninguna corrección, más bien complicada, por penetración parcial.

Hay algunas excepciones a esta regla. Por ejemplo en acuíferos libres suele bastar con un filtro abarcando únicamente la mitad o tercio inferior, ya que con un apreciable descenso de la superficie freática puede quedar en seco la porción superior del pozo. Otro caso, pero de índole económica, se presenta cuando se hacen ensayos en acuíferos de espesor muy grande.

Sí el filtro cubre menos que aproximadamente el 70% del espesor del acuífero, se tiene un pozo parcialmente penetrante o incompleto. Con ese tipo de pozo se inducen en el acuífero componentes verticales del flujo en un área de radio aproximadamente igual a 1,5 veces el espesor del acuífero y con centro en el pozo. Los descensos del nivel de agua subterránea medidos en esta área deben ser corregidos antes de utilizarlos para calcular los parámetros hidráulicos del acuífero.

En acuíferos no homogéneos, con capas de arcilla intercaladas, puede ser necesario hacer ensayos por separado en las diferentes partes del mismo. Esto puede dar también una comprobación de la cuestión de si dichas capas son impermeables o no.

Finalmente cabe señalar que se debe utilizar, especialmente si el ensayo se efectúa sin pozo de observación, un filtro apropiado que tenga suficiente área abierta para que la velocidad de entrada del agua sea baja, digamos menor que 3 cm/seg. A esta velocidad las pérdidas por rozamiento al pasar por las aberturas son despreciables y por lo tanto no causan una depresión adicional del nivel de agua en el pozo.

**Limpieza y desarrollo.** El pozo de bombeo debe estar limpio y bien desarrollado, de tal modo que no exista en él depósito alguno que pueda obstruir los filtros, ni se alteren las condiciones de permeabilidad alrededor del mismo haciendo variar el caudal específico.

**Descarga del agua bombeada.** Hay que evitar que el agua extraída del pozo vuelva a entrar al acuífero en estudio. Esto se puede hacer llevando el agua por medio de un conducto impermeable (tubo de gran diámetro, zanja impermeabilizada, etc.) hasta una distancia de, digamos 100 a 200 m, y verterla a un canal o a un cauce natural que no esté hidráulicamente conectado con el acuífero en estudio y se encuentre más allá de la línea de piezómetros.

#### 2.8.4. Piezómetros

Para los ensayos de pozo no es preciso disponer de puntos de observación fuera del pozo de bombeo, pero sí son necesarios para deducir correctamente los parámetros hidráulicos en un ensayo de acuífero. Si bien es posible obtener la transmisividad con sólo los datos de depresión en el pozo de bombeo, no es fácil alcanzar un valor correcto, debido a que las mediciones están sometidas a errores provenientes de las turbulencias causadas por la bomba y a las pérdidas de carga típicas de un pozo de bombeo.

Como la construcción de *piezómetros* o *pozos de observación* es relativamente costosa, suele recomendarse el aprovechamiento de pozos existentes, pero éstos rara vez presentan las condiciones requeridas, como ser distancia, ausencia de bomba y diámetro reducido.

##### 2.8.4.1. Número de Piezómetros

El problema de cuántos piezómetros se deben emplear depende no solamente de la información deseada y del grado de precisión requerida, sino también de los fondos disponibles. Los datos obtenidos en un único piezómetro generalmente permite calcular los valores medios de la conductividad hidráulica, de la transmisividad y del coeficiente de almacenamiento del acuífero.

La ventaja de colocar dos o más piezómetros a diferentes distancias del pozo de descarga es que el descenso de la capa de agua se puede analizar de dos formas: estudiando las relaciones tiempo - descenso y distancia - descenso. Es obvio que los resultados de los cálculos hechos de esta forma son más precisos y además son representativos de una superficie mayor del acuífero.

Siempre lo mejor es tener tantos piezómetros como las condiciones lo permitan, recomendándose en general utilizar un mínimo de tres.

##### 2.8.4.2. Distancia de los Piezómetros

Es un tema complejo, ya que se deben colocar ni demasiado cerca ni demasiado lejos del pozo de bombeo. En la primera situación se verán afectados por las distorsiones del flujo que suele existir alrededor de los pozos de bombeo y en la segunda los descensos del nivel de agua pueden ser ínfimos o tardar demasiado tiempo en manifestarse. Así, al situar los piezómetros hay que considerar los siguientes factores:

**Tipo de acuífero.** En los confinados las pérdidas de carga hidráulica se propagan rápidamente y por lo tanto pueden ser medidas a grandes distancias, por ejemplo a varios cientos de metros.

En acuíferos libres, por el contrario, la propagación de las depresiones es bastante lenta y solamente es medible a distancias bastante cortas, por ejemplo no mayores de 100 m.

Los acuíferos semiconfinados están en una situación intermedia. El que se asemejen más a uno libre o a uno confinado depende de la resistencia hidráulica de la capa semi-permeable.

**Conductividad hidráulica.** Si ésta es alta, el cono de depresión producido será extenso y plano; si por el contrario es baja, el cono será empinado y estrecho. Por tanto en el primer caso los pozos de observación pueden estar más lejos del pozo de bombeo que en el segundo.

**Caudal de bombeo.** Si es grande, el cono de depresión desarrollado será más profundo que si el caudal es pequeño. Así en la primera situación los piezómetros se podrán colocar a una distancia mayor que en la segunda.

**Longitud del filtro del pozo de bombeo.** Si es un pozo totalmente penetrante, el flujo del agua subterránea hacia el pozo es horizontal y en la interpretación de los datos se pueden utilizar las mediciones en los piezómetros ubicados a poca distancia del pozo. En un pozo incompleto, la corta longitud del filtro producirá una distribución no uniforme del descenso y con componentes verticales de flujo, lo cual será más notable en las cercanías del pozo de bombeo. Las lecturas hechas en piezómetros cercanos al pozo de bombeo pueden conducir a interpretaciones erróneas si no se aplican métodos de corrección bastante complicados. Se puede recomendar, como regla general, que los pozos de observación más cercanos a un pozo de bombeo parcialmente penetrante se encuentren a una distancia mínima igual al espesor del acuífero, donde se puede suponer un flujo prácticamente horizontal.

Sin embargo hay una excepción en la cual hay que hacer justo lo contrario: si se quiere o debe tener en cuenta la anisotropía vertical del acuífero, los piezómetros deben estar situados en la zona cercana al pozo donde en el acuífero existen componentes de flujo vertical.

**Estratificación del acuífero.** Cuando ésta existe, como ocurre frecuentemente, las depresiones observadas a una cierta distancia del pozo de bombeo pueden ser diferentes según la profundidad de observación dentro del acuífero. Estas diferencias disminuyen cuanto mayor sea la distancia al pozo de bombeo.

De lo expresado surge que con respecto a la distancia de los piezómetros no se puede dar una regla fija, aunque puede deducirse que en la mayoría de los casos se obtienen buenos resultados colocando los pozos de observación entre 10 y 100 metros del pozo de bombeo.

En el caso de acuíferos de gran espesor o acuíferos confinados estratificados, conviene una distancia mayor, digamos de 100 a 250 m, o incluso más. También es muy útil, si no necesario, instalar un piezómetro fuera del radio de influencia para poder medir el nivel de agua no afectado por el bombeo.

Si durante el ensayo las lecturas en este pozo de observación varían, por ejemplo debido a fluctuaciones naturales, estos datos se pueden utilizar para corregir las depresiones producidos por el bombeo en los demás piezómetros.

#### **2.8.4.3. Profundidad de los Piezómetros**

Es al menos tan importante como la distancia al pozo de bombeo. En un acuífero confinado homogéneo se deben colocar a una profundidad aproximadamente igual a la del punto medio del filtro del pozo de bombeo. En general la longitud del filtro de un piezómetro es de 0.5 a 1 metro, pero en acuíferos estratificados convienen longitudes mayores.

En acuíferos complejos, con capas arcillosas y/o limosas intercaladas, se recomienda instalar un piezómetro por encima y por debajo de estas capas para averiguar la posible interconexión hidráulica.

Cuando encima del acuífero a estudiar existe una capa de baja permeabilidad y dentro o encima de ella un acuífero freático, también éste debe llevar un pozo de observación a fin de poder evaluar el posible semiconfinamiento.

En acuíferos libres la profundidad de los pozos de observación y su longitud de filtros es problemática. Por un lado conviene que tengan un filtro corto ubicado en profundidad para minimizar la influencia del movimiento de la superficie freática, y por otro algunos métodos interpretativos para condiciones de drenaje diferido requieren piezómetros totalmente penetrantes.

### **2.8.5. Ejecución de los Ensayos de Bombeo**

Un ensayo de acuífero comprende típicamente las siguientes etapas:

- Mediciones de control del nivel estático durante uno o más días anteriores al bombeo, para hallar la tendencia previa de las variaciones naturales.
- Breve bombeo de prueba para ajustar los equipos, seguido de recuperación del nivel estático.
- Ensayo a caudal variable en tres a cuatro escalones de 1 hora c/u, hasta el caudal máximo del pozo o por lo menos hasta el de explotación previsto, a fin de determinar los caudales específicos y las pérdidas de carga en el pozo.
- Recuperación, con mediciones de control, del nivel estático al valor previo observado, aunque pueda llevar un día o más.
- Ensayo a caudal constante de duración adecuada al tipo de acuífero para determinar los parámetros hidráulicos del mismo, con un caudal determinado en base al ensayo escalonado.
- Ensayo de recuperación hasta alcanzar la estabilización del nivel de agua, que puede ser diferente al nivel estático previo al ensayo, a fin de corroborar los parámetros hidráulicos y la tendencia natural del nivel de agua.

Un ensayo de bombeo escalonado tiene por finalidad determinar el rendimiento de pozos de bombeo, es decir la relación entre caudal y depresión, en presencia del flujo turbulento que típicamente existe en esos pozos. Normalmente se lleva a cabo en un día y su ejecución ya ha sido descrita en el apartado 1.5.3.2 “Análisis del descenso en los pozos”.

El éxito de un ensayo de bombeo depende de la observancia de las siguientes reglas:

- No comenzar el bombeo antes de haberse recuperado totalmente el nivel estático.
- Mantener perfectamente constante el caudal.

- Medir cuidadosamente el nivel de agua en el pozo de bombeo y, preferentemente en por lo menos un pozo de observación.
- Efectuar las mediciones del nivel de agua a intervalos de tiempo adecuados y exactos.
- Registrar las variaciones de la presión atmosférica, del nivel regional de agua subterránea y del nivel de aguas superficiales conectados al acuífero.
- Realizar el bombeo con una duración adecuada al tipo de acuífero
- Mantener constante el caudal de otros pozos de bombeo que puedan existir en el área de influencia del ensayo

#### 2.8.5.1. Mediciones

Las mediciones a tomar durante un ensayo se pueden dividir en cuatro grupos:

- Mediciones de control.
- Mediciones del nivel de agua.
- Mediciones del caudal de bombeo.
- Mediciones de la calidad del agua.

**Mediciones de control.** Lo ideal es no empezar un ensayo por bombeo mientras no se conozcan las variaciones naturales del nivel del agua en el acuífero, tanto las de plazo corto como las regionales a largo plazo. Por ello, durante uno o varios días precedentes al comienzo del ensayo, se deben leer dos veces al día los niveles de agua en los piezómetros.

Para cada piezómetro se dibuja un hidrograma del que se puede deducir el sentido y la intensidad de la variación. Al final del ensayo, es decir después de la total recuperación de los niveles de agua, se continúan las lecturas del nivel de agua en los diferentes piezómetros durante uno o dos días, a fin de completar los hidrogramas, y poder determinar las variaciones del nivel de agua subterránea durante el ensayo. Con esta información se puede corregir los descensos del nivel de agua para tener aquellos producidos únicamente por el bombeo.

Un problema especial se plantea en los acuíferos costeros donde los movimientos de marea afectan al nivel de agua subterránea. Para cada piezómetro se debe obtener, antes de la realización del ensayo, un registro completo de las variaciones del nivel de agua en el acuífero, incluyendo los niveles máximo y mínimo así como el tiempo de ocurrencia

Cuando el ensayo va a durar uno o más días, se deben medir también la presión barométrica, los niveles de agua superficiales en el caso de que estén en contacto con el acuífero ensayado y la precipitación. En zonas donde existan pozos de producción, puede ser necesario controlar el funcionamiento de éstos

**Mediciones del nivel de agua.** La parte más importante de un ensayo de bombeo es medir la profundidad del agua en todos los piezómetros y también en el pozo de bombeo. Estas mediciones deben hacerse muchas veces a lo largo del ensayo y con la mayor

precisión posible, como mínimo 1 cm. Como los niveles de agua descienden rápidamente durante la primera o dos primeras horas del ensayo, se deben tomar lecturas a intervalos cortos, aumentando estos intervalos conforme se prolonga el bombeo. La secuencia siguiente da una indicación sobre los intervalos de tiempo entre dos lecturas que pueden adoptarse:

Tiempo de bombeo	Intervalos de tiempo
0 – 2 min.	0.5 min
2 – 4 min.	1 min
4 – 10 min.	2 min
10 – 30 min	5 min
30 – 100 min	10 min
100 – 300 min	30 min
5 - 48 horas	60 min
2 – 6 días	6 horas

Los intervalos mencionados son aplicables a los piezómetros situados en el acuífero en estudio y a relativamente cortas distancias del pozo de bombeo, ya que en ellos el bombeo afecta inmediatamente el nivel del agua. Para piezómetros más distantes del pozo de bombeo y para los situados en las capas confinantes y/o acuíferos adyacentes por encima o por debajo del acuífero estudiado, los intervalos cortos son menos importantes para los primeros minutos de bombeo. No es necesario seguir demasiado rígidamente los intervalos de tiempo que se han sugerido ya que lo importante es que queden más o menos regularmente distribuidos en una escala logarítmica.

Las mismas frecuencias de medición valen para la etapa de recuperación y para cada escalón de un ensayo de pozo a caudal variable

La mejor forma de medir los niveles de agua, es por medio de registradores automáticos con los que se obtienen registros continuos de las variaciones del nivel de agua. y sin necesidad de controlar permanentemente los tiempos transcurridos. Pero son algo costosos y poco difundidos en el país. Entre los dispositivos manuales, los más prácticos y frecuentemente utilizados son las sondas eléctricas luminosas y/o acústicas.

**Mediciones de caudal.** Se llevan a cabo con algún dispositivo que permita fácilmente medir el caudal y apreciar sus variaciones. En general son preferibles los dispositivos continuos de medición, como ser *caudalímetros* comerciales, *vertederos rectangulares* (para caudales grandes), *vertederos triangulares* (caudales pequeños), *tubo de Venturi* y *tubo con diafragma circular*, todos correctamente calibrados. Un sistema de aforo discontinuo muy utilizado es el *llenado de un recipiente* de capacidad conocida. A fin de tener precisión en las mediciones, la capacidad debe ser tal que el llenado tarde más de 20 segundos.

En un ensayo de pozo la precisión requerida es pequeña, pero en los ensayos de acuífero el caudal debe medirse con un error no mayor del 5%.

Las lecturas se efectúan con frecuencia, por ejemplo cada media hora, además cada vez que se sospeche de una variación, y se realizan las correcciones que sean necesarias. Durante la primera hora o segunda conviene un control más frecuente.

**Mediciones de la calidad.** Para ver si existen cambios en la composición química del agua, se mide regularmente la conductividad eléctrica del agua bombeada, por ejemplo junto con las mediciones de caudal. Además se toman muestras de agua al comienzo, medio y final del bombeo y en cada cambio importante de la conductividad eléctrica, para su posterior selección y análisis físico-químico en laboratorio.

#### 2.8.5.2. Duración del Ensayo de Acuífero

Es difícil contestar la pregunta de cuántas horas se debe estar bombeando continuamente, ya que eso depende del tipo de acuífero a estudiar y del grado de exactitud con que se quieren determinar las propiedades hidráulicas. No es recomendable economizar intentando acortar el período de bombeo, ya que el costo de alargarlo unas horas más es bajo comparado con el costo total del ensayo; en particular cuando se han construido los pozos especialmente para el ensayo.

Además se obtienen resultados mejores y más fidedignos si se continúa el bombeo hasta que el cono de depresión alcance una posición estabilizada y se tenga la impresión de que no se extenderá más alargando el bombeo. Al comienzo del ensayo el cono se desarrolla rápidamente ya que inicialmente el agua bombeada proviene de la zona del acuífero situada alrededor del pozo. Pero conforme el bombeo continúa, el cono se extiende y profundiza a una velocidad decreciente debido a que el volumen de acuífero disponible va siendo mayor por cada metro adicional de expansión horizontal.

A menudo esto conduce a la conclusión de que el cono se ha estabilizado o, en otras palabras, que se han obtenido condiciones de flujo en régimen permanente. Como, por las razones arriba mencionadas, los descensos medidos en los piezómetros son más pequeños conforme el ensayo continúa, una medición imprecisa de estos descensos también puede llevar a esta conclusión errónea. De hecho, el cono de depresión continuará extendiéndose hasta que la recarga del acuífero sea igual al caudal de bombeo.

En algunos pozos se producen condiciones de régimen permanente o equilibrio unas pocas horas después de comenzar el bombeo; en otros, por el contrario, se necesitan varios días o semanas, e incluso en algunos no se alcanzaría aunque se continuara el ensayo durante años. La experiencia muestra que en acuíferos semiconfinados generalmente se alcanza el régimen permanente después de 15 a 20 horas de bombeo. Una buena práctica para el caso de un acuífero confinado es bombear durante 24 horas. En acuíferos libres, como el cono de depresión se extiende lentamente y además generalmente debe cesar el drenaje diferido, se necesita un período mayor de bombeo y en la práctica comúnmente se bombea durante 3 días.

#### 2.8.6. Interpretación de los Ensayos de Bombeo

La interpretación de un *ensayo de pozo*, o sea de un *ensayo escalonado*, ya fue descrita en el apartado 1.5.3.2 “Análisis del descenso en el pozo” y aquí se tratará entonces el tema más complejo de los ensayos de acuífero.

Determinar los parámetros hidráulicos a partir de los resultados de un *ensayo de acuífero* involucra la aplicación directa de las fórmulas expuestas en el apartado 1.5. De los dos tipos de ecuaciones, las de régimen estacionario y las de régimen transitorio, las segundas son de lejos las más utilizadas y su método de empleo se describe más

adelante. Esa mayor difusión se debe a que el régimen estacionario tarda bastante más tiempo en alcanzarse, o bien no se alcanza nunca, y además requiere valores de depresión de por lo menos tres piezómetros, cuya construcción es relativamente costosa.

Como ya se dijo en el apartado 1.5, conociendo el caudal de bombeo y las variaciones de la depresión con el tiempo en algún punto del acuífero, o sea el resultado de un ensayo de bombeo, puede calcularse la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

Hay dos métodos de interpretación comúnmente usados para evaluar ensayos en régimen transitorio. Uno se basa en la superposición de gráficos logarítmicos y el otro en la interpretación de un gráfico semilogarítmico. Cabe recordar que en todos los casos debe verificarse el cumplimiento de las hipótesis básicas expuestas en el apartado antes mencionado.

### 2.8.6.1. Método Logarítmico

Fue inicialmente desarrollado por Theis para acuíferos confinados, pero es igualmente aplicable a acuíferos semiconfinados y libres utilizando las ecuaciones correspondientes, por ejemplo Hantush y Boulton, respectivamente (ver 1.5). El procedimiento es el siguiente:

- Preparar la "curva patrón" de la función de pozo correspondiente (Theis, Hantush, etc.), representando en papel logarítmico los valores de  $W(u)$  en función de los de  $1/u$ , tomados de los libros de texto (Custodio et al, 1976; Kruseman y de Ridder, 1970 y otros);
- Representar los valores de las depresiones  $s$  en función de  $t$  en otra hoja de papel logarítmico, de la misma escala que la utilizada para la curva patrón, siguiendo este procedimiento para los datos de todos los piezómetros disponibles;
- Colocar el gráfico de los datos medidos sobre la curva patrón y, manteniendo los ejes de coordenadas de ambas curvas paralelos, encontrar la posición en la que mejor se ajusten una a otra;
- Elegir un punto de control arbitrario en la parte en que ambas hojas se sobreponen y anotar sus coordenadas  $W(u)$ ,  $1/u$ ,  $s$  y  $t$ . Obsérvese que no es necesario que este punto elegido esté sobre la curva tipo;
- Sustituir los valores de  $W(u)$ ,  $s$  y  $Q$  en la ecuación

$$T = Q \cdot W(u) / 4 \cdot \pi \cdot s$$

y obtener  $T$ .

- calcular  $S$  sustituyendo los valores de  $T$ ,  $t/r^2$  y  $u$  en la ecuación

$$S = 4 \cdot T \cdot (t/r^2) \cdot u$$

Debe recordarse que al utilizar los métodos de curva patrón, muchas veces debe darse menos importancia a los primeros datos, ya que éstos no suelen estar completamente de acuerdo con la ecuación teórica del descenso, sobre todo porque al principio puede variar el caudal de bombeo mientras la bomba se adapta al cambio de la carga hidráulica.

Conforme se alarga el tiempo de bombeo disminuyen los efectos de tales condiciones y se puede alcanzar un mejor ajuste. Si la representación de los datos medidos tiene una curvatura plana, se pueden obtener varias posiciones de ajuste que parecen razonablemente buenas, dependiendo del criterio personal, y la solución gráfica es prácticamente indeterminada.

En el caso de un acuífero *semiconfinado*, la curva patrón está constituida por un ramillete de curvas de diferentes valores de  $r/B$ . El valor de  $r/B$  (ver 1.5.2.2) de la curva con la cual se consiguió la superposición, junto con las coordenadas del punto de control, se sustituyen en las ecuaciones correspondientes y se deduce la transmisividad  $T$ , el coeficiente de almacenamiento  $S$  y el factor de filtración  $B$ .

También cuando se trata de un acuífero *libre con drenaje diferido*, en vez de una única curva patrón existe un conjunto de ellas, una para cada uno de los diferentes valores de  $r/D$  (ver 1.5.2.3). La superposición de curvas se hace primero con el segmento inicial para hallar  $T$  y  $S$  y luego con el tercer segmento de la curva del mismo valor de  $r/D$ , para determinar la porosidad eficaz  $S'$  y nuevamente la transmisividad. Los cálculos deben dar aproximadamente los mismos valores de  $T$ . Con el valor de  $r/D$  de la curva utilizada se calcula  $D$  y luego  $1/\alpha$  el "Índice de retraso de Boulton".

### 2.8.6.2. Método Semilogarítmico o de Jacob

Este se basa en el hecho de que en el desarrollo en serie de la ecuación de Theis (ver 1.5.2.1), los términos después de  $\ln u$  se hacen despreciables para valores pequeños de  $u$ , o sea distancias pequeñas y tiempos grandes, y la fórmula del descenso puede escribirse

$$s = [2.3 \cdot Q / (4 \cdot \pi \cdot T)] \cdot \log [2.25 \cdot T \cdot t / (r^2 \cdot S)]$$

Como  $Q$ ,  $r$ ,  $T$  y  $S$  son constantes, el gráfico de la depresión  $s$  en función del logaritmo del tiempo  $t$  es una recta. Si en ese gráfico semilogarítmico  $\Delta s$  es la variación de la depresión en un ciclo logarítmico de tiempo y  $t_0$  es el valor de  $t$  en la intersección de la recta con el eje de  $s=0$ , resulta que la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento pueden expresarse por las ecuaciones

$$T = 2.3 \cdot Q / (4 \cdot \pi \cdot \Delta s)$$

$$S = 2.25 \cdot T \cdot t_0 / r^2$$

El procedimiento consiste entonces en:

#### Método I.

- Representar en papel semilogarítmico los valores de  $s$  en función del tiempo correspondientes a un piezómetro ( $r = \text{constante}$ ), situando los valores del tiempo en la escala logarítmica y trazar a continuación una recta que se ajuste a los puntos marcados.
- Extender la línea recta hasta que corte al eje del tiempo y leer el valor de  $t_0$ .

- Determinar la pendiente de dicha recta midiendo el valor de la diferencia de descensos  $\Delta s$  por ciclo logarítmico de tiempo.
- Sustituir los valores de  $Q$  y  $\Delta s$  en la primera de las ecuaciones anteriores y calcular  $T$ ; conocidos los valores de  $T$  y  $t_0$ , calcular  $S$  mediante la segunda de las ecuaciones.
- Repetir este procedimiento para todos los piezómetros disponibles, o sea para diferentes valores de  $r$ , debiendo haber concordancia entre los diferentes valores de  $T$  y de  $S$  hallados.
- Una vez determinados los valores de  $T$  y  $S$ , se sustituyen en la ecuación de  $u$  (ver 1.5.2.1) para comprobar si es menor de 0.01, o por lo menos de 0.03, condición necesaria para poder aplicar el método de Jacob.

#### *Método II.*

Se puede seguir un procedimiento más o menos idéntico representando en papel semilogarítmico los valores de depresión en función de los de distancia para un mismo tiempo, situando  $r$  en la escala logarítmica. De nuevo se ajusta una línea recta a los puntos dibujados y se prolonga hasta que corte al eje de las distancias en  $r_0$  donde  $s = 0$ . Siguiendo el mismo tipo de razonamiento que el mostrado más arriba, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$T = 2.3 \cdot Q / (2 \cdot \pi \cdot \Delta s)$$

$$S = 2.25 \cdot T \cdot t / r_0^2$$

Como en el método anterior, con los valores de  $r_0$  y  $\Delta s$  tomados del gráfico y utilizando las dos ecuaciones anteriores se calculan los parámetros  $T$  y  $S$  (nótese la diferencia existente entre los denominadores de estas dos últimas ecuaciones y las dos anteriores). El procedimiento se repite para diferentes valores de tiempo, debiendo haber una buena concordancia entre los valores de  $T$  y  $S$  obtenidos.

Cabe señalar que este método es relativamente poco usado, debido a que para obtener resultados fidedignos se necesitan al menos datos de 3 piezómetros (lo cual es costoso).

#### **2.8.6.3. Método de Recuperación de Theis**

Permite calcular la transmisividad, pero no el coeficiente de almacenamiento, empleando las mediciones del nivel de agua durante la etapa de recuperación de un ensayo, tanto en piezómetros como en el pozo de bombeo.

El ascenso del nivel de agua durante la recuperación puede expresarse por medio de la depresión residual  $s''$ , es decir, la diferencia entre el nivel de agua anterior al bombeo y el nivel medido durante la recuperación. Si  $u$  es suficientemente pequeño, esa depresión residual viene dada por

$$s'' = [2.3 \cdot Q / (4 \cdot \pi \cdot T)] \cdot \log (t/t'')$$

donde  $t$  = tiempo desde que se inició el bombeo y  $t''$  = tiempo desde que terminó el bombeo.

El procedimiento es como sigue:

- Representar en papel semilogarítmico los valores de  $s''$  en función de  $t/t''$ , situando estos últimos en la escala logarítmica, y trazar a continuación una recta que se ajuste a los puntos volcados.
- Determinar la pendiente de dicha recta midiendo el valor de la diferencia de descensos  $\Delta s''$  por ciclo logarítmico de  $t/t''$ .
- Sustituir los valores de  $Q$  y  $\Delta s''$  en la siguiente ecuación y calcular  $T$ :

$$T = 2.3 \cdot Q / (4 \cdot \pi \cdot \Delta s'')$$

## 2.9. SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA

Todos los datos obtenidos por los métodos antes descriptos, se incorporan a una síntesis hidrogeológica, en la cual se definirá el recurso, la caracterización de los distintos acuíferos y sus posibilidades de explotación. En esta síntesis hidrogeológica es de utilidad tanto un texto que atiende a la descripción de las tareas efectuadas y los resultados obtenidos, como la incorporación de tablas, mapas y representaciones gráficas, ya que facilitan mucho el análisis de los datos como la toma de conocimiento de los fenómenos hidrogeológicos que ocurren en la zona de estudio.

Generalmente se sigue una secuencia lógica que refleja el orden de aparición y resolución de los problemas hidrogeológicos desconocidos. Como ejemplo del contenido que puede presentar estas síntesis, que depende tanto de las características de la zona como del tipo y profundidad del estudio, se presentan aquí los posibles temas a considerar.

### 2.9.1. Método de Trabajo

Este ítem refleja y especifica todos los métodos y técnicas empleadas, tanto en las tareas de campo como en las de gabinete, conducentes a incorporar y generar la información necesaria para el estudio del recurso.

Se sintetizan los trabajos bibliográficos de hidrogeología y geología más trascendentes, y se indican los mapas topográficos de base y fotos aéreas utilizados indicando su escala y la fuente.

Dentro de las tareas de campo se especifica cómo se desarrollaron el censo de pozos y perforaciones, ensayos de bombeo, aforos de ríos, mediciones periódicas, prospección geofísica y perforaciones de estudio. Se aclaran los parámetros identificados en cada ocasión y los aparatos utilizados.

Para el censo de pozos y perforaciones, puede presentarse la ficha de campo tipo donde se consigna todo lo que se relevó, como ser ubicación (por coordenadas), propietario, tipo de punto de agua, profundidad, nivel de agua, etcétera.

De los ensayos de bombeo se especifica la cantidad, tipo de perforación y bomba, métodos e instrumentos de medición empleados, duración, tipo y ubicación de los pozos de observación, etc.

Cuando se especifica los trabajos de aforo, se menciona los tipos de curso de agua, metodologías, secciones analizadas, etcétera.

En lo referente a la prospección geofísica, debe mencionarse la metodología empleada, tipo y alcance del equipamiento, áreas aptas a ser relevadas en función de lo que se pretendía identificar, ubicación de los perfiles y puntos relevados y programas de interpretación utilizados.

Para las perforaciones realizadas se da su ubicación (con coordenadas), equipo y método empleados, profundidad alcanzada, frecuencia y tipo de muestreo, diseño básico del entubamiento, y toma de muestras de agua.

## **2.9.2. Resultados Obtenidos**

### **2.9.2.1. Geomorfología**

Las formas del relieve reconocidas en la región se suelen representar en un mapa geomorfológico que servirá de base para discriminar los ambientes en los cuales puede existir un acuífero, y su incidencia en la dinámica y química del agua subterránea.

### **2.9.2.2. Climatología**

Dentro del área estudiada se habrán recabado los registros de las variables climáticas de las estaciones elegidas para caracterizarla. Se debe indicar entonces su ubicación con sus coordenadas, los períodos de observación y se analiza cada una de ellas. Generalmente se suelen presentar planillas con los valores de precipitación, temperatura, humedad relativa, vientos, presión atmosférica, heliofanía y nubosidad y se preparan representaciones gráficas que visualizan la marcha de tales variables y sus tendencias, picos de máxima y mínima, valores medios, etcétera.

### **2.9.2.3. Aguas Superficiales**

Sobre la cartografía topográfica y/o morfológica se deben delimitar las cuencas o subcuencas hídricas y establecer sus superficies. Se suelen describir los cursos y clasificarlos por órdenes; se describe su diseño, cantidad de afluentes, carácter permanente o transitorio e influente o efluente, caudales y puntos de aforo. Los caudales pueden presentarse gráficamente mediante hidrogramas y/o tablas, orientadas a distinguir la diversidad de órdenes de magnitud entre cuencas o ríos, variaciones estacionales, picos de crecidas, influencia de afluentes, variaciones en las condiciones de la sección de pasaje, etcétera. Se cuantifica la escorrentía superficial mediante los datos de aforo, que permitan estimar el índice de escurrimiento para cada cauce.

### **2.9.2.4. Geología y Comportamiento Hidrogeológico**

Se suelen describir primeramente los rasgos geológicos superficiales representados en un mapa geológico del área, describiendo las unidades estratigráficas identificadas, su

litología, tipo de contactos, estructuras, datación y, sobre todo, su comportamiento hidrogeológico. Se acompañan perfiles geológicos en secciones tipos y descripciones de perfiles de perforaciones de estudio que avalen la secuencia estratigráfica y la estructura propuestas del subsuelo.

#### 2.9.2.5. Perforaciones de Estudio

Se deben presentar perfiles de las perforaciones, ya sea detalladamente a efectos de denotar las particularidades que se reconocieron en las mismas o también en forma esquemática para ejemplificar el comportamiento generalizado de un área. En los perfiles detallados deben figurar las características constructivas (profundidad total, diámetro, tipo de entubamientos, ubicación, tipo y longitud de los filtros, engravados y sellados) y todos los parámetros hidrogeológicos identificados, tales como sedimentología, acuíferos atravesados, niveles de agua medidos, ensayos de bombeo y calidad y muestras de agua. Además de perfiles individuales es conveniente confeccionar planillas que resumen todas las características principales.

#### 2.9.2.6. Prospección Geofísica

Se debe especificar el alcance de la metodología implementada en función de la geología esperada, ubicación de los perfiles y puntos relevados, método de interpretación utilizado y los resultados de la misma. Se deben presentar planillas con los datos de campo, las interpretaciones con sus gráficos y los cortes verticales elaborados con tales resultados y su posterior interpretación hidrogeológica.

#### 2.9.2.7. Aguas Subterráneas

**Hidráulica de acuíferos.** Los ensayos de bombeo deben incluir la metodología empleada, el tipo de ecuaciones que se utilizaron para determinar los parámetros hidráulicos, el empleo o no de pozos de observación y sus características; se presentan las planillas con los datos de campo y las representaciones gráficas que se utilizaron para los cálculos. También pueden elaborarse mapas de isotransmisividad o isopermeabilidad, si la densidad de información permite la interpolación y/o los sedimentos se comportan con suficiente homogeneidad con relación a estos parámetros.

**Hidrodinámica.** Los valores de piezometría y de profundidad del agua, junto con sus fechas de medición, se deben volcar en tablas, en las que pueden remarcarse los valores extremos. Con esos datos, obtenidos en el inventario hidrogeológico y en las perforaciones de estudio, puede elaborarse un mapa piezométrico y de la profundidad del agua, correspondientes a cada una de las unidades acuíferas encontradas.

Mediante la interpretación del primero se deben determinar las direcciones de flujo del agua subterránea, que se deben representar también en el mismo mapa y los posibles flujos a través de capas semipermeables; áreas de recarga, conducción y descarga; gradientes; velocidades de flujo; caudales a través de distintas secciones de pasaje y una estimación de caudales de extracción en diferentes áreas.

Si el estudio lo permite y se logra extender el monitoreo de pozos en el tiempo, se debe realizar el análisis de la variación de los niveles, pudiendo confeccionarse mapas de isovariación.

**Hidroquímica.** El conjunto de datos químicos, provenientes de los análisis de laboratorio y de las determinaciones de campo, se debe volcar en tablas, a veces en distintas unidades (ppm y/o meq/l), junto con diversas relaciones iónicas. A partir de estos datos se deben clasificar las aguas según su tipo hidroquímico y sus aptitudes para diferentes usos y se confeccionan los mapas hidroquímicos. Dentro de los mapas comúnmente presentados, se encuentra el de conductividad eléctrica, residuo seco, alcalinidad, dureza, los iones principales (cloruro, sulfato, nitrato, sodio, potasio, calcio y magnesio) y diversas relaciones iónicas.

También son muy útiles los diferentes tipos de gráficos químicos, por ejemplo Schoeller, Piper, y Stiff, siendo este último el más indicado para ser representado en mapas.

**Reservas y recursos; balance hídrico.** Los balances hídricos se deben presentar generalmente enunciando la ecuación correspondiente con sus términos expresados en porcentajes, volúmenes o caudales y/o alturas de lámina de agua y aclarando a qué lapso de tiempo corresponden. En el caso de balances calculados para una serie de períodos sucesivos, por ejemplo meses o años, éstos se deben volcar en tablas.

Con base en la determinación analítica de las reservas y recursos de agua de un acuífero puede indicarse una estimación de su capacidad de regulación ante las descargas y recargas sufridas, ya sean de índole natural o artificial (explotación). En otras palabras, permite dar una idea, frecuentemente sólo en orden de grandeza, de si el acuífero puede soportar la explotación prevista. Un mapa de isovariación de la reserva facilita esta tarea. En los casos donde se llevó a cabo un modelo del acuífero, éste proporciona una evaluación más precisa y completa de sus reservas y recursos.

**Propuesta de explotación.** Es ésta la conclusión principal del estudio, en la que se especifica el área apta para la explotación del recurso, el tipo de perforación, la profundidad a ser alcanzada, nivel acuífero a explotar, caudales y depresiones esperados, tipo de régimen de extracción, etcétera. La información con respecto a los tres últimos temas puede ajustarse mucho acompañando un modelo de simulación, aunque sea sólo uno en régimen estacionario.

## 2.10. PARTICULARIDADES DE DIFERENTES AMBIENTES GEOLÓGICOS

### 2.10.1. *Materiales no Consolidados*

La prospección del agua subterránea de una región suele iniciarse por el reconocimiento de los terrenos no consolidados. Varias son las razones; entre ellas, estos terrenos pueden recargarse a partir de lagos o ríos, sus niveles piezométricos suelen estar próximos a la superficie, son excavados o perforados con rapidez y bajo costo y poseen parámetros hidráulicos favorables.

Según sus orígenes estos depósitos pueden ser aluviales, glaciarios, eólicos, lacustres o coluviales, dando diversidad de asociaciones litológicas según estos ambientes de deposición. Los depósitos fluviales y coluviales suelen presentar una secuencia vertical sencilla, que da comienzo con los sedimentos más gruesos, constituidos por arenas y gravas, que poseen las mejores condiciones como acuífero, y culminan con sedimentos limo arcilloso, presentando alternancias e importantes cambios faciales laterales.

Conocida la textura del sedimento se puede estimar la permeabilidad de estas formaciones.

De gran interés son también los depósitos eólicos, como los loess, los mantos de arena y las dunas. En general son menos difundidos, pero hay importantes excepciones como la enorme llanura pampeana (Formada por loess) y la extensa, aunque angosta, franja de médanos a lo largo de casi toda la costa bonaerense.

Las *dunas*, o *médanos*, poseen las propiedades hidrogeológicas más uniformes de todo los materiales acuíferos. Su porosidad total se estima entre el 35 y el 40%, con una eficaz de 30 a 38% y una permeabilidad entre 5 y 50 m/día. Requieren cuidados especiales en la excavación y perforación para que el material arenoso muy fino no invada su interior. Suelen brindar importantes caudales de agua, aunque pueden tener dificultades de mantenerlos en el tiempo, ya que por sus propias condiciones naturales de drenaje se vacían muy rápidamente. Dada la naturaleza inerte de su composición mineralógica las aguas son de buena calidad química.

En los *loess* la porosidad varía mucho con el tamaño de las partículas; si predominan los más gruesos los valores de la porosidad total son del orden del 35% y en los de grano fino inferiores al 15 %. La permeabilidad también es muy variable, desde un mínimo de 0,1 mm/día a 1 m/día. Por lo general no constituyen importantes acuíferos por su baja permeabilidad, aunque en algunas zonas de la llanura pampeana su productividad es suficiente para ser explotados para riego y en otras constituyen la única fuente de agua dulce.

La exploración en estos sedimentos utiliza todas las técnicas anteriormente descriptas. En especial se debe contar con información sobre la naturaleza y el espesor de los sedimentos, por lo que se recurre a las perforaciones de estudio y a la geofísica. La información básica que se puede obtener por el inventario hidrogeológico suele ser abundante, permitiendo deducir la secuencia sedimentaria, los niveles de agua subterránea y su calidad química (que suele ser buena).

### **2.10.2. Rocas Ígneas y Metamórficas**

Donde estas rocas afloran en grandes extensiones, los recursos hídricos subterráneos son escasos y frecuentemente los aprovechamientos existentes están limitados a las formaciones aluviales que rellenan los pequeños valles.

Dentro de las rocas ígneas más comunes se incluyen los granitos, dioritas y gabros y dentro de las metamórficas las filitas, pizarras y esquistos. Las posibles asociaciones litológicas con sus cambios bruscos y su particular estructura, junto con su complejidad acuífera, dificultan en alto grado su exploración hidrogeológica.

Cuando los afloramientos rocosos ígneo - metamórficos son abundantes, la cartografía geológica de detalle es sumamente útil, brindando información acerca de las fallas, fracturas, diaclasas, contactos, etcétera.

Por lo general la porosidad total y eficaz de estas rocas es inferior al 3% y sus permeabilidades tan pequeñas que suelen ser consideradas nulas. Es a través de las fracturas o zonas meteorizadas que llegan a desarrollar algún interés como acuífero, pero esa característica disminuye y/o desaparece con la profundidad. Las fracturas aisladas

que no están asociadas a grandes sistemas de fallas producen solamente un pequeño aporte a la porosidad de estas rocas.

La permeabilidad global es altamente anisótropa. La meteorización de estas rocas suele dar lugar a materiales muy sueltos que alcanzan porosidades totales del 35%. Los caudales de explotación generalmente son bajos, existiendo una amplia variación de caudales entre los pozos de una misma región de emplazamiento, respondiendo directamente al grado de alteración y/o fracturación.

Se ha comprobado que la topografía es un factor muy importante a considerar en los trabajos de prospección, recomendándose descartar las zonas de fuerte pendiente, donde la erosión ha eliminado el material de alteración y las laderas en las que la fracturación y el espesor de los depósitos coluviales son menores.

Los estudios geomorfológicos ayudan a identificar espesores importantes de roca alterada o formaciones aluviales, mientras que la fotointerpretación pone de manifiesto la presencia de fallas, intrusiones y zonas dolomitizadas.

Los métodos geofísicos son de difícil utilización en estas rocas, pero pueden brindar un aporte valioso con respecto al reconocimiento de las estructuras y la tectónica que las afectan. También se han utilizado frecuentemente los métodos sísmicos para la determinación del espesor de roca alterada.

La interpretación de los ensayos de bombeo requiere metodologías específicas, ya que no son aplicables las ecuaciones del flujo en medio poroso. La calidad química del agua subterránea es generalmente excelente, mientras que la contaminación puede constituir un problema donde el suelo que recubre las formaciones acuíferas tenga escaso espesor o esté ausente.

### **2.10.3. Rocas Volcánicas**

Dentro de este grupo el comportamiento hidrogeológico es muy variable. Por ejemplo los acuíferos en basaltos recientes tienen altas transmisividades, mientras que los que se encuentran en tobas, a pesar de su alta porosidad, tienen una permeabilidad muy baja. La porosidad y permeabilidad de los basaltos compactos no fracturados, es prácticamente nula. Por lo tanto su permeabilidad varía en función de estructuras primarias y secundarias, del diaclasamiento, la interconexión vesicular, su alteración mineralógica y meteórica, más que por su propia litología.

Generalmente los métodos de exploración son dirigidos no solamente a la ubicación de horizontes permeables sino también a la localización de niveles y estructuras impermeables que impidan el alejamiento rápido del agua infiltrada.

Son frecuentes los suelos enterrados entre potentes series de lava superpuestas, constituyendo horizontes impermeables y dando lugar a acuíferos colgantes. Estas y otras intercalaciones sedimentarias entre las secuencias lávicas, especialmente las piroclásticas, contribuyen almacenando el agua subterránea; al tiempo que las rocas lávicas proporcionan la transmisividad necesaria para conducir el agua hacia los pozos de bombeo.

Es destacable un parámetro que en que otros medios no resulta tan relevante: el predominio local de la permeabilidad horizontal. La misma se debe a la presencia de espacios huecos que suelen existir entre las coladas de lava.

En zonas de rocas volcánicas la recopilación de datos para el inventario es semejante a la de ambientes sedimentarios. Toma relevancia el análisis preliminar de la historia geomorfológica de la región determinando la posible existencia de antiguos valles con sus depósitos aluviales permeables. La fotointerpretación geológica requiere un análisis detallado de estructuras y ubicación de las zonas de mayor concentración de diques.

Estos últimos en general constituyen importantes barreras verticales frente al desplazamiento horizontal de las aguas subterráneas.

Las técnicas geofísicas tienen generalmente aplicación limitada, debido al escaso contraste de las variables físicas medibles, lo cual conduce a una difícil interpretación.

Las perforaciones de estudio y de explotación se hacen generalmente por percusión, ya que los fluidos de inyección de una perforación rotativa se perderían en los estratos volcánicos fisurados.

También suele practicarse el sistema de captación mediante galería para extraer agua subterránea colgante sobre niveles impermeables y/o retenida detrás de diques. Las perforaciones de exploración para estas galerías suelen realizarse mediante los sondeos mecánicos de pequeño diámetro típicos de la investigación minera, con extracción de testigos con corona de diamante.

La mayor parte de las aguas subterráneas provenientes de rocas volcánicas poseen una excelente calidad química, aunque existen aquellas vinculadas a fuentes termales y fumarolas que les proporcionan contenidos salinos elevados haciéndolas inaceptables para ciertos usos.

## **2.11. MODELOS DE ACUÍFERO**

Frecuentemente el sistema de flujo en un acuífero es bastante más complejo que el flujo radial hacia un pozo descrito anteriormente al tratar el movimiento del agua subterránea y la hidráulica de pozos; por ejemplo la respuesta de los niveles piezométricos en una batería de pozos, el efecto de límites impermeables y/o de recarga, la variación de los niveles piezométricos en un acuífero con una explotación intensiva y/o de largo plazo, el posible avance de una interfaz de agua subterránea salada, el comportamiento de un acuífero múltiple y otros.

La mejor manera de resolver estos complejos sistemas de flujo es mediante modelos, entendiéndose por modelo de un acuífero el procedimiento, ya sea analítico, matemático o analógico, que nos permite realizar la simulación de su comportamiento, o lo que es lo mismo, reproducir los estados del sistema, las acciones sobre él y las leyes que las relacionan.

En la mayoría de los casos prácticos lo que interesa saber es el comportamiento del sistema ante una serie de alternativas de explotación posibles, para saber si son factibles y si cumplen una serie de restricciones físicas, económicas o técnicas. Para simular el

sistema, se parte de sus componentes físicos y geométricos y de un estado inicial, se le aplica una serie de acciones (por ejemplo bombeo y recarga) de las que se quiere conocer la reacción del acuífero y se obtiene como resultado las situaciones que alcanzaría el sistema en períodos sucesivos de tiempo (por ejemplo variación de los niveles piezométricos).

Existen tres tipos básicos de modelos que han sido utilizados en hidrogeología: físicos, analógicos, y matemáticos.

Un modelo físico está hecho del mismo material que el sistema natural. Por ejemplo puede construirse un recipiente plástico en escala y llenarlo de arena con una conductividad hidráulica en escala a la del acuífero real. Al hacer circular agua, preferentemente coloreada, se puede medir los niveles piezométricos en tubos insertados en la arena.

El flujo de agua a través de un medio poroso es gobernado por ecuaciones similares a las del flujo de electricidad a través de un conductor, lo que también vale para el flujo de un fluido viscoso entre dos placas con un espacio muy reducido entre ellas. De ahí que puedan construirse modelos empleando circuitos eléctricos o el flujo de un líquido viscoso para simular acuíferos reales o ideales. Estos son los llamados modelos analógicos, puesto que su funcionamiento es análogo al del acuífero verdadero. Típicamente se utilizan para modelar el flujo en dos dimensiones, pudiendo ser tanto horizontales como verticales.

Todos los modelos físicos y analógicos tienen algunas desventajas importantes: deben ser contruidos por alguien hábil en carpintería, plomería y/o electricidad, requieren ambientes adecuados para su construcción, alojamiento y almacenamiento y las inversiones en tiempo y materiales para modelos relativamente grandes son considerables.

Por otro lado modelos de este tipo no son flexibles, siendo muy difícil cambiar la geometría del acuífero y las características hidráulicas una vez contruidos. Sin embargo bajo ciertas condiciones, por ejemplo el flujo en régimen transitorio con pozos muy poco distanciados y condiciones de borde no lineales, un modelo eléctrico puede ser más exacto que uno matemático.

Los modelos hoy en día más utilizados son los matemáticos o digitales, entendiéndose por tales a los que utilizan métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial del movimiento del agua subterránea mediante una serie de instrucciones y datos introducidos a una computadora digital.

Una gran ventaja de estos modelos es su flexibilidad, dado que un mismo programa de computación puede servir para una gran cantidad de modelos de diferentes sistemas acuíferos. Actualmente estos programas están disponibles comercialmente y el hidrogeólogo ya no necesita escribirlos, aunque algunos conocimientos de programación son muy útiles.

La aplicación efectiva de modelos matemáticos a la resolución de problemas de flujo del agua subterránea es un procedimiento cualitativo. En primer lugar el hidrogeólogo debe decidir si un modelo matemático es necesario a los fines del proyecto y luego cual de los métodos numéricos es el más apropiado. Una vez elegido un método o programa particular, debe verificar la confiabilidad de los datos disponibles necesarios para correr el programa y la de aquellos a ser utilizados para la comprobación de los resultados.

Debido a que los datos disponibles nunca son tan abundantes como sería de desear, probablemente tenga que llenar huecos con valores estimados, interpolados o extrapolados. Si bien correr el programa suele ser bastante sencillo, la interpretación de las salidas en general no lo es y puede llegar a ser muy difícil. Los resultados computados pueden no coincidir muy bien con los datos observados, siendo entonces necesario ajustar los datos de entrada y correr nuevamente el programa hasta alcanzar una concordancia satisfactoria; este proceso de ajuste es conocido como la calibración del modelo.

Con el modelo calibrado pueden entonces efectuarse predicciones, pero debe tenerse mucho cuidado para no obtener predicciones irreales. De lo expresado surge que la aplicación exitosa de un modelo requiere la combinación de conocimientos de hidrogeología, de programación (o por lo menos computación), del acuífero a ser modelado y de la implementación de modelos.

### 2.11.1. Modelos Matemáticos

Para poder definir el movimiento del agua en un acuífero se necesita conocer los siguientes datos:

- Su geometría (extensión vertical y horizontal).
- La superficie piezométrica.
- Los parámetros hidráulicos del acuífero cubriendo toda su extensión.
- Los parámetros hidráulicos de capas semiconfinantes.
- Las condiciones en los límites del sistema (impermeables, de flujo constante o de nivel piezométrico constante).
- Las condiciones del sistema en el instante inicial ( $t=0$ ).
- El valor de las acciones externas sobre el sistema (recarga y bombeo).

Basada en la ley de Darcy y el teorema de la continuidad, la ecuación diferencial que describe el movimiento del agua en un acuífero es:

$$\partial q_x / \partial x + \partial q_y / \partial y + \partial q_z / \partial z + R = S' \cdot \partial h / \partial t$$

donde:

$q$  = caudal específico (o velocidad de flujo de Darcy)

$h$  = nivel piezométrico

$S'$  = porosidad eficaz

$R$  = recarga/descarga neta

$t$  = tiempo

Si se substituye  $q$  por la ecuación de Darcy se obtiene la ecuación

$$\partial(k_x \cdot \partial h / \partial x) / \partial x + \partial(k_y \cdot \partial h / \partial y) / \partial y + \partial(k_z \cdot \partial h / \partial z) / \partial z + R = S' \cdot \partial h / \partial t$$

en la cual  $k_{x,y,z}$  es la conductividad hidráulica en dirección de los ejes de coordenadas.

Un modelo de un acuífero es entonces un procedimiento que permite reflejar las condiciones del sistema acuífero y resolver la ecuación de flujo de forma suficientemente aproximada de acuerdo a las necesidades.

De los dos procedimientos numéricos principales usados para resolver la ecuación diferencial, el de diferencias finitas y el de elementos finitos, el primero es el más desarrollado y fácilmente comprensible y el de aplicación más sencilla.

Con él se obtiene la solución de la ecuación mencionada para una serie de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. La descripción del sistema se hace por medio de elementos celulares asignados a cada uno de los puntos del espacio elegidos.

La ecuación diferencial se aproxima por una serie de ecuaciones algebraicas en que las incógnitas son las alturas piezométricas en los puntos escogidos (nodos) y las variantes del método consisten en el planteamiento de esas ecuaciones y en la forma de resolverlas. Básicamente el modelo calcula la ecuación algebraica sucesivamente para cada una de las celdas a lo largo de las filas o columnas de la malla, arrancando en uno de los límites y continuando hasta llegar al otro.

La modelación de un acuífero se efectúa a través de los siguientes pasos:

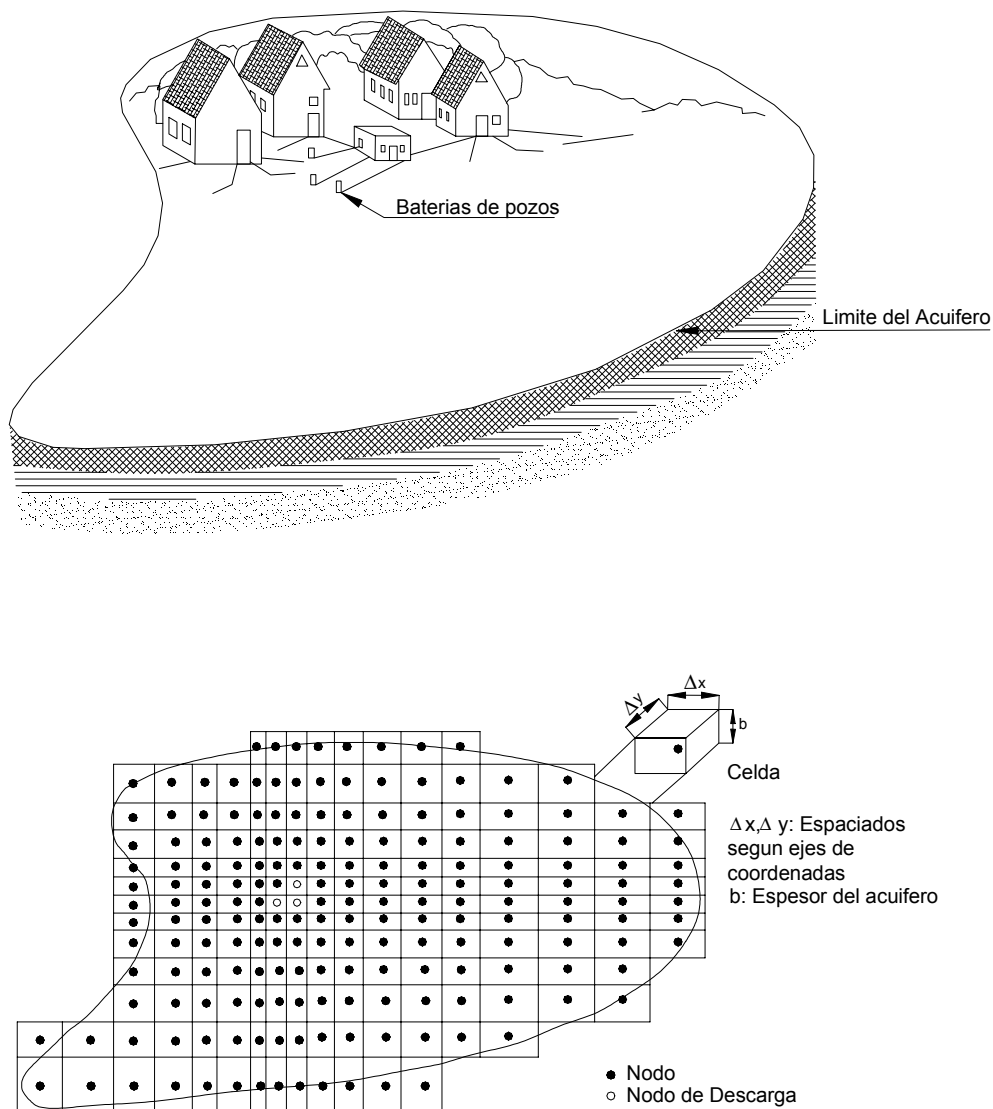
- Recopilación y análisis de los datos disponibles, o sea aquellos obtenidos en la exploración hidrogeológica.
- Desarrollo de un modelo conceptual que describe las características y el funcionamiento del sistema acuífero.
- Preparación de los datos necesarios para calcular el modelo, de acuerdo a lo indicado más adelante.
- Simulación de acciones históricas (recarga y bombeo actuales).
- Comparación de los resultados con datos históricos (niveles piezométricos registrados en las observaciones periódicas).
- Si corresponde, modificación de los parámetros introducidos y/o del modelo conceptual y repetición de los dos pasos anteriores hasta lograr resultados coherentes, es decir, la calibración del modelo.
- Análisis de sensibilidad de las diferentes variables ajustadas en la calibración;
- Simulaciones de predicción de la evolución de los niveles piezométricos en respuesta a las diferentes acciones externas futuras.

Estas tareas no deberían considerarse como pasos independientes, sino más bien como un proceso de retroalimentación. Lo mejor es usar el modelo no solamente como herramienta de predicción, sino también como una ayuda en la conceptualización del

comportamiento del acuífero. Así puede, por ejemplo, ayudar a definir cuáles y cuántos datos deben ser investigados durante la exploración hidrogeológica.

La *preparación* de los datos comprende en primer lugar la determinación de los límites de la zona a ser modelada. Estos límites pueden ser físicos (bordes impermeables, de recarga o de nivel piezométrico constante) o simplemente convenientes, por ejemplo delimitando un sector de un acuífero de gran extensión. Luego la región a modelar debe ser discretizada, eso es, subdividida en celdas o bloques individuales de acuerdo a una cierta malla.

Esta puede ser rectangular o poligonal, en función del procedimiento numérico a ser usado; para el método de diferencias finitas en general son rectángulos de tamaño variable (ver **Figura 16**).



**Figura 16.** Vista y malla de diferencias finitas de un acuífero hipotético

Una vez establecida la malla, se introduce para cada celda los parámetros del acuífero y los datos iniciales requeridos por el modelo, como ser el coeficiente de almacenamiento, la transmisividad, la recarga, etcétera.

Los *resultados* computados consisten en los niveles piezométricos en cada uno de los bloques a lo largo y a lo ancho de toda la zona modelada. Esta distribución areal del nivel piezométrico es calculada en cada uno de los intervalos de tiempo en que fue subdividido el período de interés.

En general la *calibración* comienza con una simulación en régimen estacionario, es decir, sin considerar los pasos del tiempo. Los niveles piezométricos calculados son comparados con los observados en el instante inicial, generalmente aquellos medidos en un cierto momento de la exploración, permitiendo un primer ajuste de los parámetros introducidos y de las características del acuífero. Más adelante, en el régimen transitorio, los niveles piezométricos simulados en función de las acciones externas aplicadas (recargas y descargas, naturales y/o artificiales) son comparados con los observados en el campo durante el mismo lapso de tiempo.

Si el modelo es correcto, la mayor o menor correspondencia entre ambos indica la exactitud de los datos iniciales de entrada. Casi siempre resulta necesario modificar algunos de éstos hasta que todos los valores observados y calculados coincidan con suficiente precisión.

No existe una norma que fije cuando la coincidencia es satisfactoria. El número de corridas necesario para producir un resultado satisfactorio depende de los objetivos del modelo, de la complejidad del sistema de flujo, de la cantidad y calidad de datos disponibles y de la longitud del período de observación de niveles.

Una vez calibrado, el modelo puede ser usado para *predecir* el comportamiento futuro del acuífero. El objetivo principal de una predicción es generalmente la estimación del desenvolvimiento del acuífero bajo una variedad de esquemas de explotación. Más específicamente, un modelo de acuífero permite conocer con razonable exactitud la recarga (natural y/o inducida), por ejemplo desde capas semiconfinantes, los efectos de bordes, los efectos de la ubicación y del distanciamiento de pozos y los de diferentes esquemas de bombeo.

Al evaluar los resultados de una predicción debe tenerse en cuenta las limitaciones de un modelo, la exactitud en la coincidencia del comportamiento acuífero simulado con el observado y la confiabilidad de los datos utilizados.

#### **2.11.1.1. Modelo Visual Modflow**

Entre el gran número de modelos matemáticos públicamente disponibles (hay mucho más de 100), Visual MODFLOW de Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Ontario, Canadá es uno de los más prácticos. Combina en el entorno Windows una interfaz gráfica para la entrada de datos, el manejo del modelo y la salida de resultados, con los modelos de diferencias finitas MODFLOW y MODPATH (del U.S. Geological Survey) para el flujo y el movimiento de partículas del agua subterránea respectivamente, los modelos MT3D (del U.S. Geological Survey) y RT3D (de Battelle Northwest) para el transporte de solutos, y el programa ZONEBUDGET (del U.S. Geological Survey) para calcular balances de agua de sectores parciales del área modelada, por ej. el flujo a una batería de pozos, a un sistema fluvial o de una capa acuífera a otra. En su última versión, la 2.8,

el modelo incorpora también el programa de estimación de parámetros WinPEST para la calibración automática.

Puede simular en tres dimensiones el flujo del agua subterránea y el transporte de solutos en sistemas acuíferos múltiples. En el transporte de solutos puede incluir fenómenos de advección, dispersión, desintegración, reacciones químicas y adsorción, usando el método de características y sus modificaciones o también el de diferencias finitas. La interfaz gráfica contiene un menú que guía al usuario a través de los pasos necesarios para construir, calibrar y evaluar un modelo de flujo y de transporte de solutos.

En la modelación los programas permiten efectuar tareas tales como:

- Asignar gráficamente todos los parámetros de flujo y transporte necesarios.
- Calibrar el modelo usando técnicas manuales o automáticas.
- Visualizar e imprimir en color los resultados en forma de planta o de corte vertical.
- Seleccionar diferentes tipos de borde y los efectos de cada uno.
- Examinar los efectos de heterogeneidad y anisotropía.
- Analizar el impacto de ríos y lagos.
- Simular acuíferos múltiples.
- Trazar líneas de flujo y delimitar áreas de captación.

Entre sus aplicaciones pueden mencionarse las siguientes:

- Evaluación de sistemas de explotación o remediación de agua subterránea.
- Delimitación de áreas de captación y de protección de pozos de bombeo.
- Simulación de la atenuación natural de contaminantes en el agua subterránea.
- Diseñar y optimizar la ubicación de pozos para proyectos de explotación y de depresión.
- Determinar líneas de flujo y plumas de contaminantes para evaluación de riesgos.

Para su versión más reciente requiere un equipo de las siguientes características mínimas:

- Microprocesador Pentium.
- 32 Mb de RAM.
- 55 Mb de espacio libre en el disco rígido.
- Monitor VGA y mouse.
- Windows 95 /98 o NT (también está disponible para Windows 3.x y DOS).

El modelo viene acompañado de 3 manuales: los manuales de referencia del USGS para MODFLOW y MODPATH , y un amplio manual del usuario para Visual MODFLOW.

## **Construcción del modelo**

Toda la entrada de datos se efectúa mediante una interfaz gráfica interactiva, de manera que el usuario debe tratar con ubicaciones físicas y tiempos reales en vez de coordenadas de malla y pasos de modelación. Por ejemplo, para definir los datos de una perforación, se señala la misma con un clic del mouse y la ventana de diálogo que aparece, conteniendo un esquema del pozo y las coordenadas del mismo, se completa con los datos constructivos de la perforación y del régimen de bombeo en tiempo real. Si más tarde se modifica la malla, sea en el plano horizontal o agregando nuevos estratos, toda la información de la perforación se conserva y su ubicación es automáticamente adaptada a la malla nueva. Del mismo modo son tratados los datos referentes a los bordes, los parámetros y las dimensiones de los acuíferos, los valores de recarga, etcétera; las heterogeneidades de los acuíferos son introducidas definiendo en la pantalla celdas de propiedades diferentes.

Además de este método directo de entrada de datos, Visual MODFLOW también puede importar archivos de datos MODFLOW existentes (incluyendo de versiones anteriores), archivos AutoCAD o bitmap para los mapas del área modelada y cotas de puntos individuales o de un reticulado.

## **Operación del modelo**

Durante el proceso de simulación, el modelo permite controlar el proceso numérico modificando los parámetros de resolución y los criterios de convergencia. También muestra en pantalla, en tiempo real, un gráfico de los datos de la convergencia y un resumen gráfico detallado de los resultados del programa ZONEBUDGET.

Después de cada corrida exitosa, Visual MODFLOW crea automáticamente todos los archivos necesarios para generar las representaciones gráficas utilizadas en el análisis y la evaluación de los resultados de la simulación.

## **Calibración del modelo**

Tanto para la calibración de la simulación del flujo de agua subterránea como para la del transporte de solutos, Visual MODFLOW puede producir las siguientes representaciones gráficas de los datos:

- Gráfico de dispersión (x, y) de los datos observados en función de los calculados.
- Histograma de los valores residuales de calibración.
- Valores calculados y observados en función del tiempo.
- Datos estadísticos de calibración en función del tiempo.
- Mapas de isolíneas de los valores residuales de calibración.

La calibración del modelo también puede realizarse en forma automática, indicando al programa WinPEST los parámetros que se deseen modificar.

## **Interpretación de los resultados**

Para visualizar e interpretar los resultados de la modelación, Visual MODFLOW lee automáticamente los resultados de cada simulación exitosa y ofrece una amplia gama de formatos gráficos para exhibirlos, en color, mediante vistas en planta y cortes transversales. Puede crear mapas de isolíneas, si se desea con intervalos coloreados, tales como:

- Niveles piezométricos.
- Depresión.
- Concentración de solutos.
- Superficie freática.
- Diferencias entre niveles piezométrico de diferentes capas.
- Flujo entre diferentes capas.
- Cotas y espesor de las capas.
- Recarga neta.

Igualmente puede mostrar vectores de velocidad de flujo y líneas de flujo, como así también resúmenes gráficos de balances de masa locales y globales.

Estos resultados pueden ser impresos por cualquier impresora o plotter soportado por Windows 95/98/NT.

El programa Visual Groundwater (también de Waterloo Hydrogeologic, Inc., Canadá ) puede importar directamente todos los parámetros y resultados del modelo y exhibirlos en forma tridimensional y con animación.

### 3. CAPTACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se denomina captación de agua subterránea a toda obra destinada a facilitar la obtención de cierto volumen de agua para satisfacer una demanda, sea esta familiar, urbana, industrial, agrícola, etc.

Cuando se habla de captaciones para explotación de aguas subterráneas se alude implícitamente a pozos verticales. Existen sin embargo otros sistemas constructivos que permiten alcanzar el mismo fin, tales como captaciones horizontales y pozos radiales

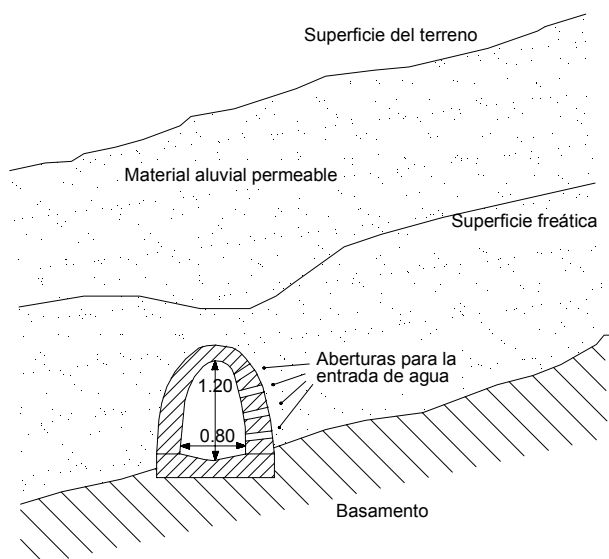
Los factores que condicionan la elección del tipo de obra de captación a construir en una región determinada son diversos; sin duda las condiciones hidrogeológicas son las que más inciden, pero no deben olvidarse las tradiciones constructivas de la zona, la disponibilidad de materiales y maquinarias, el grado de desarrollo técnico del lugar, las disponibilidades económicas, las situaciones legales y la idoneidad del responsable técnico del proyecto.

#### 3.1. CAPTACIONES HORIZONTALES

Son excavaciones casi horizontales que se internan en las formaciones permeables hasta llegar a la zona saturada, de donde captan el agua y la conducen o bien a la superficie o a un pozo colector. Si bien su construcción es relativamente complicada y/o costosa, la producción de agua en general es barata, puesto que la mayoría lo obtiene por gravedad, o sea sin consumo de energía. Cabe distinguir dos tipos de estas estructuras: las zanjas de captación y las galerías filtrantes.

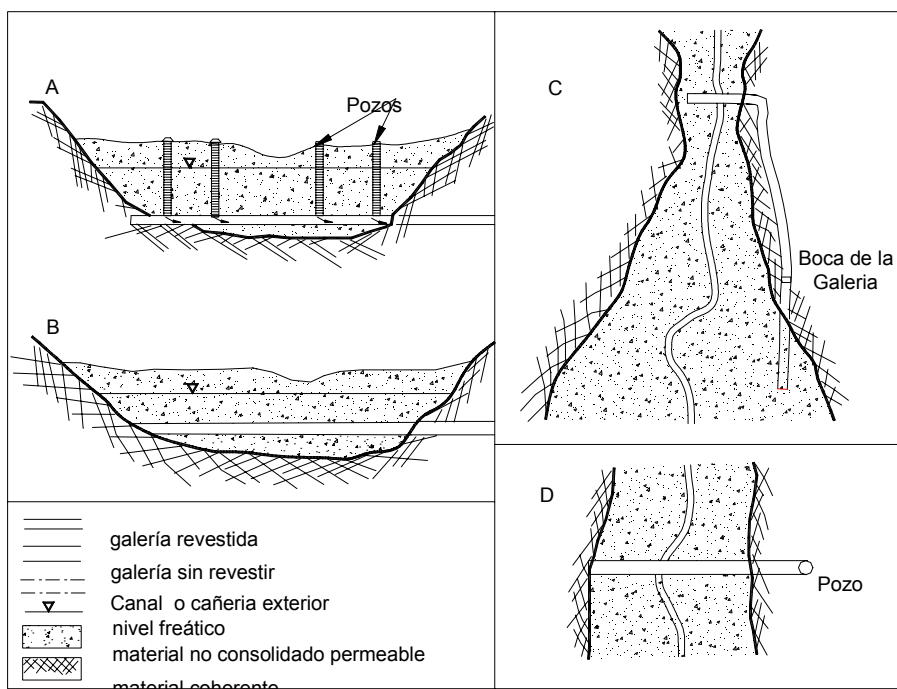
Las galerías filtrantes se excavan casi siempre a mano, bajo la superficie del terreno y en roca consolidada; sólo excepcionalmente pueden excavar a cielo abierto en aquellos tramos en los que su profundidad es menor. Al excavar a mano, sus dimensiones suelen ser las mínimas que permiten a un hombre trabajar de pie, es decir, del orden de 1,80 metros de altura por 0,90 metros de ancho. En terrenos sueltos se excava con pico y pala y a veces barra; en roca suelen usarse martillos neumáticos y barrenos. El transporte de materiales se realiza con carretillas o vagonetas. La utilización de la maquinaria actual de perforación de túneles a base de "topos" altamente mecanizados no suele emplearse por el elevado costo y la frecuente dificultad de traslado hasta la boca de la galería.

En terrenos sueltos es necesaria la entibación o el revestimiento (**Figura 17**), realizado conforme va avanzando la excavación, debiendo asegurarse la posibilidad de entrada del agua a la galería. Primitivamente los revestimientos eran de piedra, que luego evolucionaron hacia la utilización de ladrillos. Actualmente se colocan anillos o elementos de hormigón prefabricados o a veces se procede a utilizar técnicas típicas de la construcción de túneles, tales como cementaciones, bulonado, etc. Cuando se emplean anillos o elementos de hormigón prefabricados, se suele dejar un espacio libre entre uno y otro para permitir la entrada del agua.



**Figura 17.** Esquema de una galería filtrante en terreno suelto

Naturalmente la disposición de las galerías filtrantes es tan variable como pueden serlo los propios acuíferos y las condiciones topográficas; algunos ejemplos se muestran en la **Figura 18**.



A)- Los pozos drenantes adicionales.

B)- Simple

C)- Captando un acuífero en material no consolidado y otro en consolidado con extracción de agua por gravedad.

D)- Con pozo lateral para la extracción de agua por bombeo.

**Figura 18.** Diferentes esquemas de galerías filtrantes

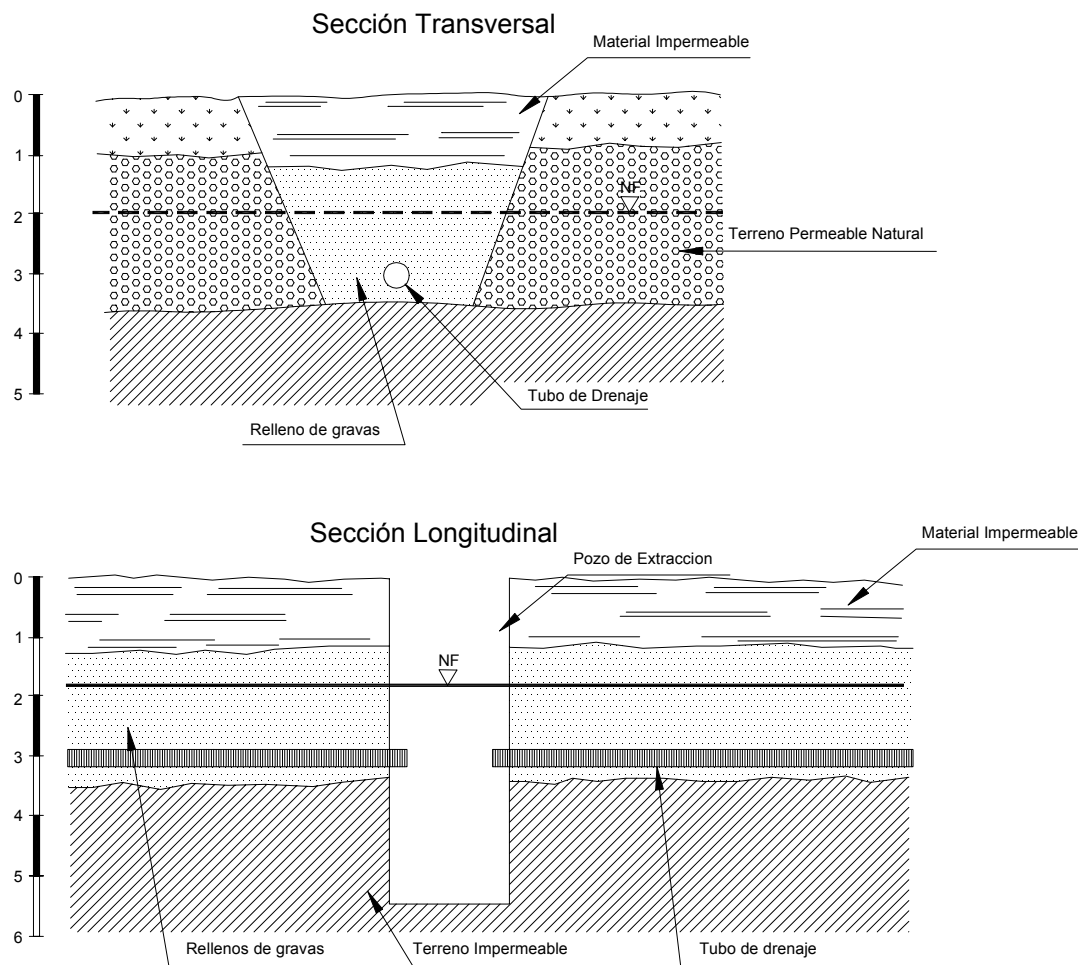
Las galerías filtrantes son captaciones conocidas desde tiempos remotos: hace 2700 años se construían en Armenia los denominados “ghanats”.

Actualmente casi no se construyen por los altos costos que involucran, salvo en condiciones muy especiales (Custodio et al, 1976) cuando éstas no permiten otra solución sencilla; como podría ser por ejemplo en acuíferos de espesor muy reducido y además demasiado profundos para una zanja de captación o acuíferos colgados en terrenos abruptos y/o elevados, o también siguiendo las tradiciones de una región. Las galerías presentan también el problema de no poder ajustar su caudal a las necesidades, derrochándose agua en épocas de bajo consumo, lo cual es grave en zonas áridas o donde se explotan las reservas. En general no es fácil instalar cierres en las galerías, ya sea por las elevadas presiones que pueden desarrollarse, ya sea por la dificultad de anclar las compuertas, ya sea porque el agua se fuga de la galería por las paredes. La solución mejor es disponer de depósitos reguladores, aunque pueden ser caros. Otro inconveniente es que muchas veces los caudales drenados van disminuyendo con el tiempo, debido a que la mayoría de las galerías extraen el agua en régimen transitorio, con un caudal final insuficiente e incluso inapreciable.

Las zanjas de captación o drenes son excavaciones, generalmente en materiales no consolidados, realizadas desde la superficie hasta llegar a la zona saturada, evacuando el agua captada por gravedad si la pendiente lo permiten, o por bombeo en la propia zanja o en un pozo colector (ver **Figura 19**). Actualmente se pueden excavar fácilmente hasta algunos metros de profundidad utilizando máquinas zanjadoras o retrocavadoras, Su penetración en el acuífero suele ser limitada (por los problemas de desagote) y en consecuencia los caudales se ven afectados por las fluctuaciones de la superficie freática, pudiendo llegar a cero en períodos de sequía pronunciada.

Si el material es suficientemente coherente pueden dejarse a cielo abierto, pero es mucho más común instalar en un lecho de grava y/o arena una tubería filtrante con aberturas apropiadas y luego cubrir la zanja con material impermeable; el filtro y la grava se diseñan con el mismo método empleado para pozos verticales (ver 3.3.5 y 3.3.6). Frecuentemente el dren así colocado se conecta a un pozo de extracción situado en un extremo o en la intersección de varios drenes.

Cuando se quiere aumentar su capacidad filtrante, las captaciones horizontales pueden combinarse con pozos verticales de pequeño diámetro (ver **Figura 18**).



**Figura 19.** Zanja de captación con pozo colector

### 3.2. POZOS RADIALES

En algunos países los pozos radiales o de drenes horizontales tienen amplia difusión sobre todo cuando se desea extender el radio efectivo para aumentar el caudal específico de la captación. Son los denominados pozos Ranney, Fehlmann o Preussag según su método constructivo para instalar los drenes.

En el sistema Ranney las perforaciones radiales se realizan con los mismos tubos filtrantes definitivos, que así quedan ya directamente instalados. Por tal razón, dichos tubos han de ser de acero, con paredes gruesas y las ranuras de forma alargada en el sentido longitudinal de los mismos.

El sistema Fehlmann utiliza tubos de perforación, de 267 milímetros de diámetro, que se retiran después de la colocación de los filtros. Con ello se consigue que el material y la abertura de ranura de los tubos filtrantes puedan ser elegidos de acuerdo con las propiedades químicas del agua subterránea y con la granulometría y permeabilidad del terreno acuífero a explotar.

En ambos sistemas es posible construir los drenes con cierta inclinación hacia arriba, lo que posibilita penetrar más de un horizonte acuífero con el mismo dren.

El sistema Preussag utiliza tubos de perforación análogos a los del sistema Fehlmann, colocando después prefiltros de arena. La instalación de estos últimos puede ser problemática y además difícilmente adaptable a posibles variaciones de las granulometría a lo largo del dren.

En general se construye una cámara estanca de unos tres metros de diámetro, hincando cilindros de hormigón a medida que se cava. Desde dicha cámara, durante la etapa constructiva final, se realizan las labores de perforación de los drenes horizontales, que suelen ser de unos 30 a 50 m de longitud (Custodio et al, 1976). Posteriormente durante el servicio de la captación, la cámara sirve como elemento receptor y depósito de los caudales extraídos (ver **Figura 20**) y para facilitar las maniobras de cierre y apertura de cada dren.

El pozo con drenes horizontales se comporta, considerando aparte las pérdidas de carga interiores, como un pozo vertical de gran radio. Tanto es así que se denomina radio equivalente,  $r_e$ , al radio que tendría un pozo vertical que diese, con el mismo descenso, el mismo caudal. Para un mismo descenso, la relación de caudales será la inversa de la relación de los logaritmos naturales de las distancias. Existe una relación variable según el valor del radio de influencia, R:

$$2,6 \leq Q_h / Q_v = \ln(R/r) / \ln(R/r_e) \leq 5,4$$

donde  $Q_h$  = caudal del pozo radial de radio equivalente  $r_e$  y  $Q_v$  = caudal del pozo vertical de radio  $r$ .

Pero además, el descenso posible de un pozo radial es superior al de un pozo vertical, en general al menos en un 20%, diferencia que será más sensibles en los casos en que el espesor de la capa sea débil. Se tiene, pues, en definitiva:

$$3 \leq Q_h / Q_v \leq 6,5$$

Como a menudo el radio de influencia es más reducido en terrenos de pequeña o escasa permeabilidad, el pozo radial será más interesante a medida que la permeabilidad disminuya. Por otra parte, cuando la permeabilidad es grande, otro factor se convierte entonces en importante: la velocidad de entrada a través de las aberturas del filtro. Será mucho menor en el pozo radial a raíz de su mucho mayor superficie filtrantes y en consecuencia el caudal admisible en el mismo es muy superior al de un pozo vertical.

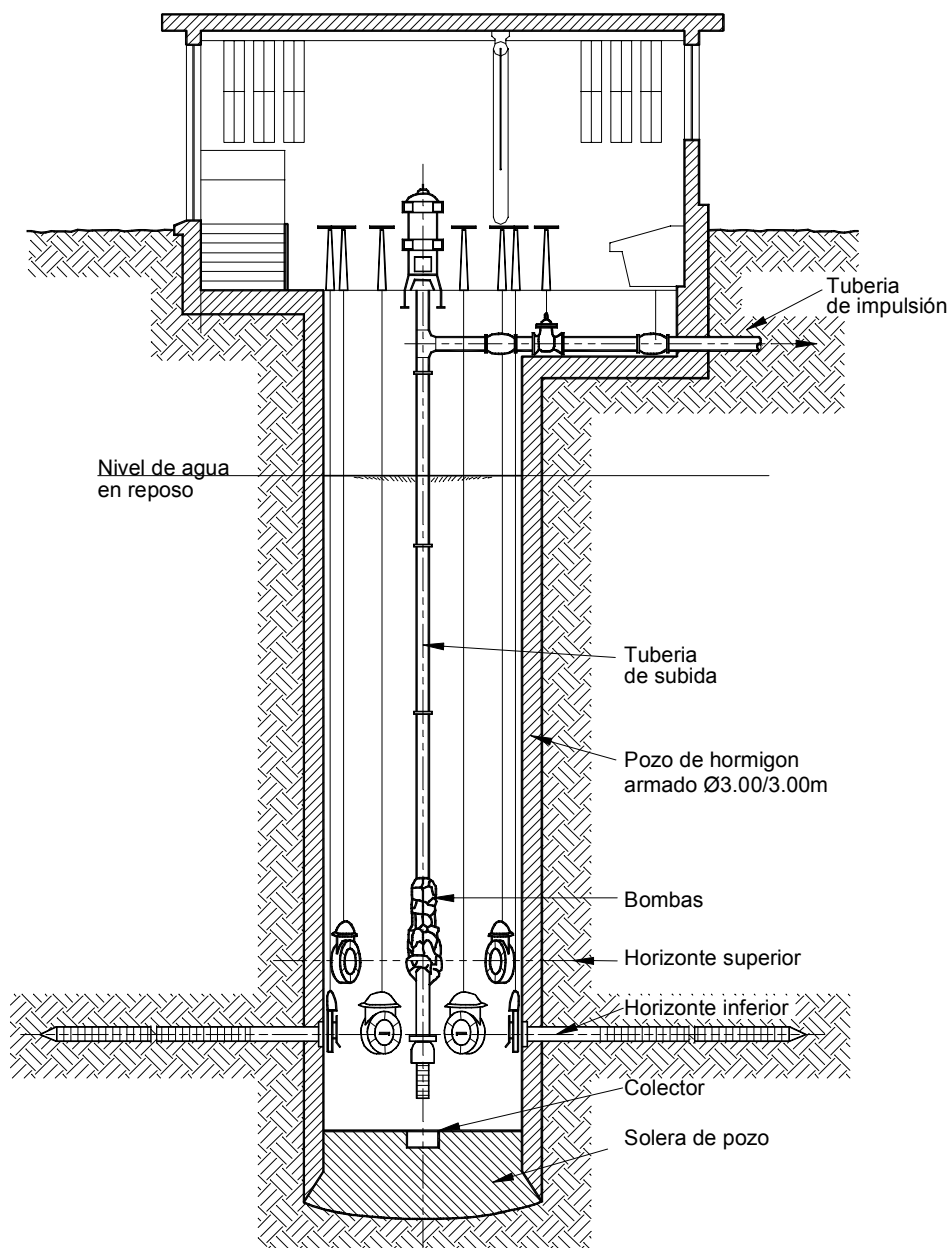
Con respecto a la hidráulica del acuífero, ésta en principio es similar al de un pozo vertical y todas las teorías existentes puede utilizarse, en particular las fórmulas de Dupuit, Theis, Jacob, la teoría de imágenes, etcétera. Es que a cierta distancia del pozo, el acuífero ignora cual es el sistema establecido para obtener el agua. Sólo el límite inferior de las ecuaciones, es decir el radio del pozo, ofrece cierta dificultad y en su lugar debe utilizarse el ya mencionado radio equivalente. Este, según Custodio et al (1976), está dado por la siguiente fórmula:

$$r_e = 0,8 a_m \sqrt[n]{1/4}$$

donde  $a_m$  = longitud media de los drenes y  $n$  = número de drenes

En resumen, en terrenos incoherentes puede ser conveniente la construcción de pozos radiales en los siguientes casos:

- En acuíferos de espesores pequeños a medios.
- En acuíferos de permeabilidad débil a moderada.
- En acuíferos de alta permeabilidad para obtener grandes caudales en una sola captación.



**Figura 20.** Pozo radial

### 3.3. POZOS VERTICALES

Se denominan pozos verticales a todos aquellos que se proyectan y construyen para obtener agua por penetración vertical de una capa acuífera.

Por su bajo costo y facilidad constructiva, los *pozos cavados* manualmente o “*jagüeles*”, son muy comunes en las áreas rurales. El diámetro generalmente es superior a un metro, y la profundidad varía según la región entre unos pocos metros hasta varias decenas.

Dentro de los considerados pozos *menores* es común construir mecánicamente pozos de diámetro reducido, frecuentemente de poca profundidad y destinados a bombas manuales y/o molinos.

El proyecto de un pozo vertical de *alta capacidad* requiere la definición de varios parámetros ligados entre sí. Como cuestión previa ha de plantearse el objetivo del pozo respecto al acuífero a explotar: si sólo se desea extraer un determinado caudal o se quiere alcanzar el máximo posible que permita el acuífero. Un buen proyecto será aquel con el que se consiga un adecuado equilibrio entre eficiencia, vida útil y costos.

Los parámetros a tener en cuenta son los siguientes:

- Profundidad.
- Método de perforación.
- Entubado.
- Diámetro.
- Filtro y prefiltro de grava.
- Desarrollo.
- Protección sanitaria.

#### 3.3.1. Profundidad

Depende de las características de la formación a explotar, tanto si se trata de un acuífero libre como de uno cautivo, procurándose en general que atravesase todo el espesor acuífero. Se define sobre la base de los estudios geológicos, las perforaciones de exploración, las investigaciones geofísicas, los datos censados de pozos anteriores y toda otra información que resulte de utilidad.

#### 3.3.2. Método de Perforación

El método de perforación a utilizar dependerá de la naturaleza de los terrenos a ser atravesados, de la profundidad y del diámetro o diámetros necesarios.

Será conveniente utilizar el método de percusión para profundidades no demasiado grandes y en materiales friables heterogéneos (por ejemplo arenas con rodados pequeños); también en formaciones fisuradas donde se producirían excesivas pérdidas

de lodo si se perforara a rotación. Este último método por su parte se recomienda para terrenos incoherentes y de dureza media.

En casos de elevada dureza y poca fragilidad y en materiales sueltos muy heterogéneos (por ejemplo conteniendo rodados grandes y bloques) el método más adecuado es percusión a martillo neumático.

Una variante del método rotativo para terrenos no consolidados es el de circulación inversa se denomina así porque el lodo de perforación en vez de subir por el espacio anular, lo hace por el interior de las barras de perforación, que para ello tienen un diámetro mayor. El método tiene la ventaja de que permite perforar diámetros grandes, hasta aproximadamente 1 m y en sedimentos heterogéneos gruesos, pero el inconveniente de consumir considerables volúmenes de agua.

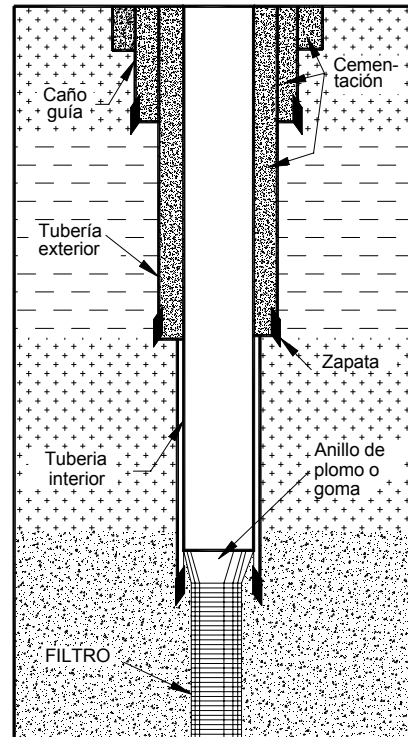
### **3.3.3. Entubado**

El entubado de un pozo desempeña en general dos misiones fundamentales: sostener las paredes de la perforación y constituir la conducción hidráulica que pone en comunicación al acuífero con la superficie del terreno y/o con los elementos de extracción. Cuando una misma perforación atraviesa varios niveles acuíferos, el entubado participa en la función de sellar aquellos que no se desee explotar sea para evitar una mezcla de aguas o para dar estabilidad a la perforación. En esos casos el entubado puede ser “telescópico”, es decir, de diámetros decrecientes con la profundidad, como puede verse la **Figura 21A**.

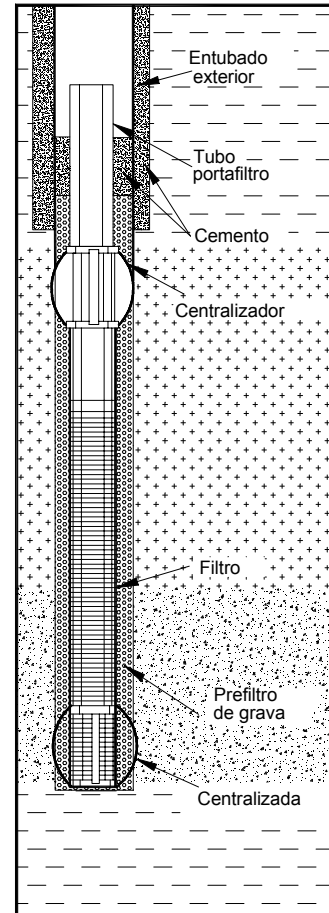
Durante la construcción de un pozo puede ser necesario, sobre todo en perforaciones a percusión, recurrir a un entubado provisorio para sostener los horizontes ya perforados, por ejemplo en terrenos incoherentes. Los métodos a rotación en general buscan evitar entubados provisorios utilizando lodos de inyección ya que los mismos dan una mayor estabilidad a las paredes de las perforaciones mediante la formación de depósito de arcilla en estos y/o para la mejor presión ejercida por el peso de la columna de lodo.

Las tuberías en general son metálicas y no es conveniente la utilización de metales distintos, pues las uniones de los tramos favorece la corrosión electrolítica. Actualmente suelen utilizarse con frecuencia las tuberías de plástico reforzado (PVC aditivado), un material resistente, sin problemas corrosivos y de bajo peso. La utilización de uno u otro dependerá de la disponibilidad de materiales, de las características del terreno y del agua subterránea, de los costos y del criterio constructivo del responsable.

A



B



C

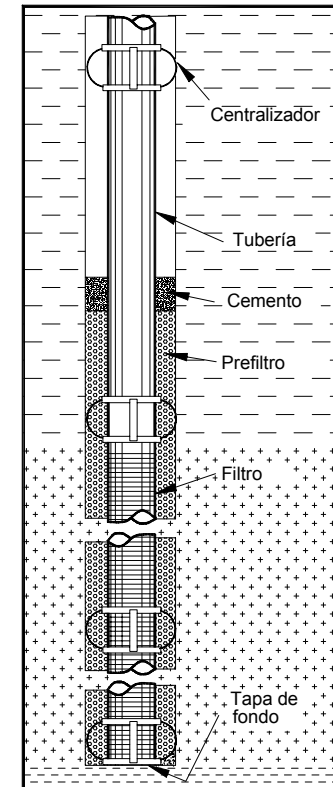


Figura 21. Pozos perforados con diferentes entubados

### 3.3.4. Diámetro

El diámetro de una perforación está condicionado por el de la tubería, y esta a su vez por las características generales del proyecto. En general el entubado puede descomponerse en dos tramos bien definidos: uno es el que permite la entrada del agua desde la capa acuífera (filtro) y el otro es el que enlaza el anterior con la superficie del terreno y donde va colocada la bomba de extracción. En el primero el diámetro debe ser tal que permita la entrada y el paso del caudal a extraer sin pérdidas de carga excesivas. El tramo superior deberá tener el diámetro y espesor necesario para permitir el paso y movimiento cómodo de la bomba y los accesorios, incluyendo el tubo piezométrico y los sensores guardaniveles. Se aconseja un espacio mínimo de 75 a 100 mm. entre el diámetro interno de la tubería y el externo máximo de la bomba, (lo que en bombas electrosumergibles incluye el cable de alimentación).

Para el caso de entubados telescópicos, valen los mismos criterios, adaptados en función de la profundidad del acuífero (Ver **Figura 21**).

### 3.3.5. Filtro

Se denomina filtro o rejilla al revestimiento permeable del tramo del pozo que coincide con el estrato acuífero, o con un sector de éste. Su función es muy importante ya que debe permitir la entrada de agua libre de materiales sólidos y con la menor pérdida de carga posible.

Existen diversos tipos de filtro; desde los improvisados practicando agujeros en un caño de entubamiento hasta los más perfeccionados de ranura continua, de acero inoxidable o de plástico reforzado (PVC aditivado).

Son varios los factores a tener en cuenta para definir adecuadamente el filtro en el proyecto de una perforación. Tanto la longitud, el diámetro, el tamaño de abertura y la resistencia son funciones de la geometría, la granulometría y los parámetros hidráulicos del acuífero a explotar. Una vez determinada la longitud y tamaño de abertura del filtro, el diámetro se establece en función del caudal requerido y ello sobre la base de consideraciones relativas a la velocidad del paso del agua a través del filtro considerando el área abierta del filtro. Dicha velocidad no debe provocar pérdidas de carga excesivas ni producir fenómenos de corrosión o de incrustación. Generalmente se considera, de acuerdo a experiencias de campo y de laboratorio, que la velocidad óptima se sitúa alrededor de los 3 cm/seg, aunque algunos autores la hacen variar en función de la permeabilidad del acuífero (Walton, en Custodio et al, 1976).

Tanto la longitud apropiada del filtro, como el caudal, el área efectiva de abertura y la velocidad óptima de entrada del agua han sido relacionadas por Walton (en Custodio et al, 1976) mediante la siguiente fórmula:

$$A_e = 1000 \cdot Q / \lambda \cdot u$$

donde:

$A_e$  = área abierta efectiva del filtro en  $\text{cm}^2$  por m de longitud

$Q$  = caudal del pozo en l/seg

$\lambda$  = longitud óptima del filtro en m

$u$  = velocidad óptima de entrada de agua al filtro (cm/seg)

Establecidos entonces los valores de  $Q$ , y conocidos  $u$  y  $A_e$ , puede estimarse la longitud óptima del filtro. El área abierta efectiva es aquella parte del área abierta total,  $A$ , que no queda obstruida por el material que envuelve al filtro. Depende sobre todo de la forma y tipo de abertura del filtro y de la forma y tamaño de los granos que constituyen el acuífero y el prefiltro de grava. En realidad es desconocida, pero se calcula que el área abierta efectiva  $A_e = 0,5 A$ , o sea que la mitad del filtro queda bloqueada, basado en algunas observaciones de campo.

Otro aspecto a tener en cuenta es la resistencia del filtro, tanto mecánica como química, particularmente a la corrosión e incrustación. Generalmente se recomienda la utilización de materiales homogéneos y resistentes como el acero inoxidable, y evitar las uniones entre distintos metales para no promover la corrosión galvánica, aunque en la práctica esto no es del todo posible pues significaría un entubado totalmente de acero inoxidable.

El PVC aditivado (de mayor resistencia mecánica que el común) es el material de filtro más resistente a la corrosión, pero no a la tracción, al impacto y al aplastamiento

**Abertura de filtros.** Los análisis granulométricos de las muestras obtenidas durante la perforación (preferentemente la de exploración) revelan las características del material acuífero que permiten definir tanto el tamaño correcto de la abertura del filtro como el de los granos del prefiltro de grava cuando éste se utiliza.

El análisis granulométrico de cada muestra de arena se lleva a un gráfico para obtener una curva que muestre la distribución de los diversos tamaños de grano. Para poder comparar la granulometría de una y otra muestra de arena es necesario ajustarse a un procedimiento uniforme de los ensayos.

Como se ha indicado en 1.3.3.2 el proceso mecánico se realiza a través de tamices superpuestos de tamaño decreciente. Se vuelca en un gráfico el porcentaje acumulativo retenido en cada uno de los tamices en función del tamaño de grano retenido y se obtiene así la "curva característica granulométrica" o "curva acumulativa". El porcentaje retenido se representa en la escala vertical (aritmética) y la abertura de la malla, o sea el tamaño de grano, en la escala horizontal (logarítmica).

En una formación homogénea de arena, la abertura del filtro debe retener entre el 40 y 50 % de la arena. Para determinar el valor de esa abertura se escoge el punto de la curva acumulativa en que la línea horizontal correspondiente al 40 o 50%, intercepta a la curva acumulativa; luego se lee la correspondiente abertura de rejilla en la escala horizontal de tamaños.

En formaciones heterogéneas estratificadas, las aberturas se calculan en función de la gradación de cada uno de los horizontes. Se tendrá entonces diferentes secciones de filtro cuyas aberturas se ajustan al material de cada estrato individual. Para evitar el riesgo de un eventual bombeo de arena conviene aplicar en estos casos además las siguientes dos reglas importantes: si el material fino se ubica por encima de un estrato de material grueso, debe extenderse el tamaño de abertura por lo menos 0,6 metros dentro

del estrato inferior y el tamaño de abertura de éste no debe superar el doble de la abertura que se emplea para el material fino.

### 3.3.6. Prefiltro de Grava

Si bien los costos de construcción resultan superiores, ciertas condiciones hidrogeológicas hacen conveniente el uso de un prefiltro de grava en el espacio anular comprendido entre el filtro y la pared de la perforación, cuya granulometría, al igual que la abertura de filtro, se calcula en función de los análisis granulométricos de las muestras de sedimentos de la formación acuífera.

Entre estas condiciones pueden mencionarse:

- Arena fina uniforme; con prefiltro de grava puede aumentarse el tamaño de abertura del filtro sin riesgo de un bombeo de arena, logrando un mayor rendimiento del pozo.
- Agua subterránea incrustante; el mayor tamaño de abertura del filtro alarga su vida útil.
- Acuíferos confinados de gran espesor; como requiere una gran longitud de filtros puede utilizarse uno de menor diámetro.
- Acuíferos estratificados; muchos acuíferos consisten en capas alternadas de materiales finos, medianos y gruesos, en los que resultaría muy difícil diseñar una abertura de filtro apropiada, siendo más fácil el cálculo de un prefiltro de grava.

Existen diversas técnicas para el diseño de los prefiltros de grava, pero como la grava debe retener los granos del acuífero, todos tienen en común el empleo de un factor de multiplicación que relaciona la granulometría del acuífero con la del engravado. Esto se basa en el hecho geométrico de que en un conjunto de esferas éstas son de 2,41 a 6,46 veces mayores que el espacio entre ellas, según el empaquetamiento del conjunto.

Uno de los métodos más usuales, y el más indicado para filtros de ranura continua, es el de Johnson (1966), a saber:

- Se construyen las curvas granulométricas de todos los estratos que componen el acuífero y se elige el de grano más fino para determinar el tamaño de grano de la grava.
- Se multiplica el tamaño de grano correspondiente al 70 % retenido por un factor que va desde 4 a 6, pudiendo usarse uno entre 6 y 9 cuando la gradación no es uniforme e incluye limos. Se utiliza 4 cuando la formación es fina y uniforme y 6 si es más gruesa y heterogénea. El resultado numérico de la multiplicación se sitúa en el gráfico sobre la línea horizontal correspondiente al 70 por ciento retenido, constituyendo este punto el primero de la curva que va a representar la gradación del material del filtro artificial de grava.
- A través de este punto inicial se dibuja por tanteo una curva acumulativa suave que represente a un material cuyo coeficiente de uniformidad sea de 2,5 o menos.
- A continuación se preparan las especificaciones del material del prefiltro de grava, escogiendo primero unos 4 o 5 tamaños de tamiz que abarquen toda la amplitud de la curva, y luego se establece un rango permisible del porcentaje retenido en cada

una de las cribas escogidas; este rango permisible puede ser de unos 8 puntos de porcentaje por encima y por debajo del porcentaje de retención dado para cualquier punto de la curva.

- Como último paso se selecciona un tamaño de abertura de filtro que sea capaz de retener un 90% o más del material del prefiltro de grava.

Un ejemplo del diseño de un prefiltro de grava está incluido en "Planos y Diseños Típicos"

De acuerdo a la experiencia, por razones prácticas el espesor de un prefiltro de grava no debe ser inferior a unos 7 cm ni superior a los 20 cm. El primero obedece a las necesidades de la maniobra de su colocación en la perforación, y el segundo a la efectividad de las tareas de desarrollo. Para lograr un espesor relativamente uniforme y sobre todo el mínimo necesario, los caños filtro y porta filtro llevan en su exterior "centralizadores" adecuados al diámetro de la perforación (ver **Figura 21 B y C**).

### **3.3.7. Cementación**

El cementado de un pozo tiene por finalidad principal unir la tubería de revestimiento con la pared de la perforación. Con ello se consigue:

- Evitar que las aguas superficiales contaminen los acuíferos.
- Evitar la comunicación de un acuífero utilizable con otros que no lo son.
- Evitar una fuga de agua por la comunicación con un " horizonte ladrón " (de menor nivel piezométrico).
- Aumentar la resistencia mecánica y a la corrosión de las tuberías de revestimiento.

Los materiales utilizados son casi siempre suspensiones de cemento en agua o de cemento mezclado con bentonita. El agregado de bentonita incrementa el tiempo de fraguado y reduce la resistencia mecánica de la mezcla, pero mejora sus propiedades aislantes disminuyendo o evitando el resquebrajamiento y la separación del cementado de la tubería. Esta aislación puede realizarse solamente en el borde inferior de la tubería, de manera tal que se forme un anillo de cemento de unos 2 a 3 metros entre esta y la pared de la perforación o rellenando todo el espacio anular hasta la superficie, dependiendo de las necesidades de cada obra y de los costos.

### **3.3.8. Desarrollo**

El desarrollo de una perforación en rocas incoherentes, tiene por objeto eliminar las fracciones más finas de material en las inmediaciones del filtro, tanto naturales del acuífero como remanentes del lodo de perforación cuando éste fue utilizado. Con esto se estabiliza la formación y se alcanza una granulometría más gruesa y uniforme alrededor de los filtros. La consecuencia es un aumento de la capacidad específica del pozo, mayor rendimiento con menores costos y aumento de la vida útil de las bombas.

Los diversos métodos utilizados en terrenos de gravas y arenas consisten en provocar artificialmente la entrada y salida del agua a través del filtro a fin de lograr una cierta agitación del material de la formación y su consecuente limpieza.

Es evidente la importancia que reviste la elección adecuada del tipo y tamaño de la abertura del filtro con relación al tamaño de grano de la formación acuífera; si es demasiado pequeña limita la entrada de agua y si es grande permite la entrada continua de arena al pozo con las consiguientes pérdidas de eficiencia y desgaste de las bombas.

En rocas coherentes pueden utilizarse los mismos métodos de desarrollo que en las incoherentes y cuando son consolidadas y de bajo rendimiento se puede agregar, según la litología, fracturación hidráulica, explosivos y/o acidificación. El desarrollo se extiende hasta que el pozo no de señales de mejora adicional, o sea que el caudal específico se mantenga constante.

Los métodos más comunes utilizados son:

- Pistoneo.
- Sobrebombeo.
- Bombeo intermitente.
- Aire comprimido.

**Pistoneo.** Consiste en empujar y aspirar el agua en el pozo para producir un enérgico flujo hacia adentro y hacia afuera del acuífero a través de las aberturas del filtro. Con ello se logra forzar el material más fino del acuífero a entrar al pozo, del cual se lo saca posteriormente por los métodos disponibles (cuchareo, bombeo, etcétera).

La forma de realizarlo es mediante un émbolo confeccionado con un material flexible (cuero, goma, etcétera) colocado entre discos de madera dura y prensados por discos de acero.

El diámetro del pistón debe ajustarse al interior del caño y puede ser accionado mediante las barras de perforación, bajándolo unos 3 a 5 metros por debajo del nivel de agua y produciendo un movimiento de vaivén que transmite su efecto por la incompresibilidad del agua. Comúnmente se utilizan dos tipos de pistones: pistón cerrado o macizo y pistón abierto o de válvula, siendo el último de acción más suave.

Para acelerar el proceso de eliminación de los restos del lodo de inyección (bentonita), se suele agregar un polifosfato al agua del pozo. Después de dejarlo reposar un período más o menos prolongado, por ejemplo una noche, se realizan las operaciones de pistoneo descriptas.

**Sobrebombeo.** Consiste en bombear un pozo con un caudal notablemente superior al que se pretende extraer durante su explotación. Es un método sencillo y económico pero incompleto e incluso contraproducente, porque el flujo de agua es en un solo sentido y los granos finos de arena pueden acumularse entre los gruesos y/o en las aberturas del filtro.

**Bombeo intermitente.** Consiste en provocar paros y arranques sucesivos de la bomba con la finalidad de crear variaciones bruscas de presión y de la dirección de flujo a través del filtro, utilizando una bomba sin válvula de pie, preferentemente del tipo centrífuga de eje vertical.

**Aire comprimido.** Es un método muy práctico y efectivo que combina la agitación con el bombeo. Primero se produce una fuerte agitación soltando repentinamente un gran

volumen de aire en el pozo y luego se efectúa el bombeo por la elevación normal de agua mediante aire comprimido.

**Chorros de alta velocidad.** Consiste en lanzar chorros de agua horizontales de alta velocidad a través de las aberturas del filtro, de modo que se agita vigorosamente el engravado y/o la formación acuífera, soltando y arrastrando el material fino, sea del acuífero o del lodo de inyección. Es un método efectivo en materiales granulares sueltos y con filtros de ranura continua.

### 3.4. PROTECCIÓN SANITARIA

Cuando el agua subterránea se destina a consumo humano deben tomarse precauciones para evitar su contaminación.

El agua extraída puede estar contaminada por efecto de la actividad industrial, doméstica antes o durante la operación del pozo y también por las maniobras realizadas durante el proceso de perforación a través de cañerías, filtros, lodo de inyección, bomba, etcétera.

Hay una serie de pautas a tener en cuenta en todo proyecto de explotación, que comienza con la elección del lugar de emplazamiento del pozo con respecto a la ubicación de pozos ciegos, cámaras sépticas, corrales, redes cloacales, industrias contaminantes, etc., tema que será tratado más adelante en el punto “Áreas de Protección”.

En el pozo mismo la contaminación desde la superficie o la proveniente de acuíferos superiores puede penetrar a través del espacio anular exterior al revestimiento o circular en el interior del mismo. Para evitar esa posible contaminación directa, en la construcción del pozo deben tomarse las medidas de protección adecuadas.

En primer lugar las tuberías de revestimiento deben estar cementadas correctamente en estratos impermeables, a fin de aislar tanto los contaminantes superficiales como los provenientes de otros acuíferos.

Si bien es común alojar la cabeza de pozo en una cámara subterránea, ésta se inunda fácilmente y a fin de evitar la entrada de aguas exteriores a la tubería de revestimiento, ésta debe al contrario sobresalir del terreno circundante por lo menos 0,50 metros, y alrededor de la misma construirse una placa de cemento con pendiente hacia la periferia (ver **Figura 22**).

Cuando la bomba es del tipo sumergible, la abertura superior del entubado debe quedar bien cerrada con una tapa ajustada provista de aberturas con juntas estancas para el paso de los elementos instalados en el pozo, como ser caño de la bomba, tubo piezométrico y guardaniveles.

También se recomienda la colocación de un tubo de ventilación cubierto con malla fina o relleno de lana de vidrio, permitiendo la entrada de aire cuando el bombeo hace descender el nivel de agua en el pozo y reduciendo la condensación de humedad.

Cuando la bomba está instalada directamente sobre el pozo (por ejemplo una de eje vertical), debe cuidarse que la tubería del pozo ajuste herméticamente en la abertura en

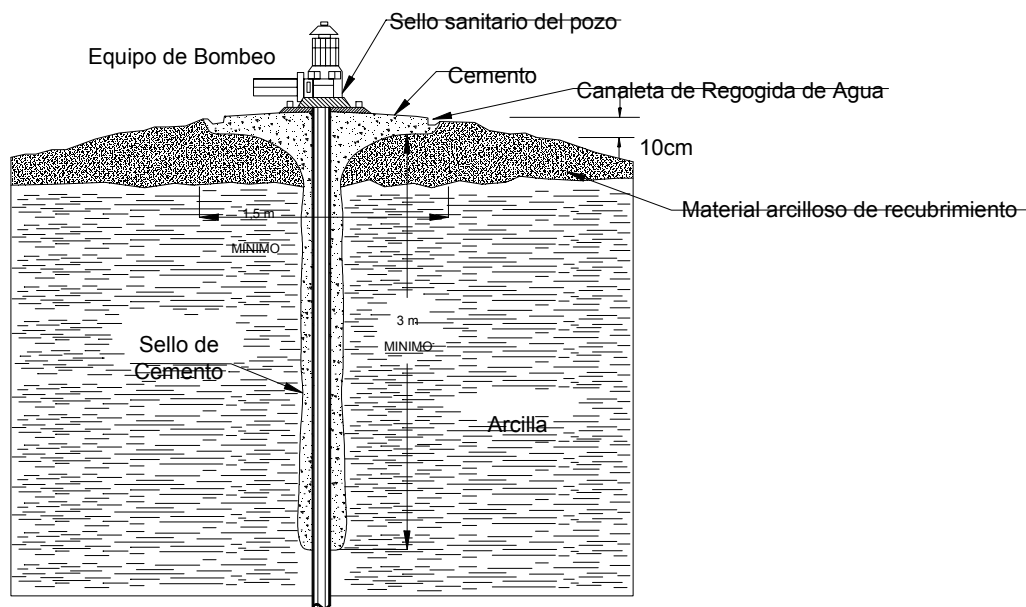
la base de la bomba, dejando un orificio para el tubo piezométrico y los cables de los guardaniveles.

Una vez terminada la construcción de una perforación es imprescindible hacer una completa desinfección de la misma. Los métodos son varios pero normalmente se usa una solución con 50 a 200 mg/l (normalmente 100 mg/l) de cloro activo, disolviendo en agua hipoclorito de calcio, de sodio, o cloro libre. La desinfección debe incluir al prefiltro de grava, al acuífero en el borde del pozo, al sistema de extracción de agua y a los conductos y tanques de almacenamiento.

**Abandono y sellado de pozos.** Cuando se abandona un pozo de producción o de exploración, éste debe ser sellado a menos que se decida utilizarlo como pozo de observación, en cuyo caso deberán tomarse las medidas necesarias para su acondicionamiento.

El sellado de perforaciones abandonadas es imprescindible por motivos tales como: eliminar riesgos físicos potenciales; prevenir la contaminación del acuífero desde la superficie; evitar que el pozo actúe como interconexión directa entre distintos acuíferos y evitar pérdidas en acuíferos surgentes.

Para su empleo como pozo de observación debe ser equipado con una robusta y hermética cabeza de pozo con tapa de acceso. En el caso de una perforación de exploración, esta necesita ser entubada, cementada, etc. con los mismos cuidados y detalles de una de producción.



**Figura 22.** Protección sanitaria de la parte superior de un pozo perforado

### **3.5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA**

#### **3.5.1. Control de Captaciones y Acuíferos**

Como el rendimiento y la vida útil de una explotación del agua subterránea están íntimamente ligados a la evolución de los acuíferos y de las captaciones, el control de ambos es imprescindible para lograr un manejo apropiado del recurso.

##### **3.5.1.1. Control de Acuíferos**

Se lleva a cabo monitoreando el nivel piezométrico y la calidad química del agua en una red de observación, integrada por pozos existentes adecuados, si los hubiere, y principalmente por pozos construidos a tal fin. Para que el control de ambos parámetros permita conocer la evolución del acuífero, prevenir cualquier variación en la calidad del agua extraída y efectuar los ajustes necesarios para su corrección, es necesario que las observaciones se realicen dentro y fuera del área de influencia de las captaciones.

La frecuencia necesaria de los controles depende del comportamiento de la zona. Como éste en general es desconocido, el monitoreo se puede iniciar con una frecuencia alta para luego, al cabo de uno o más ciclos hidrológicos y/o climáticos, pasar a una frecuencia menor adaptada a las variaciones observadas.

Esto se aplica sobre todo a los análisis químicos por ser de costo relativamente alto. Para disminuir estos, puede además limitarse las determinaciones del siguiente modo:

- Análisis parciales mensuales o bimestrales, con determinación de conductividad eléctrica, aniones principales y nitrato.
- Análisis completos, incluyendo elementos nocivos para la salud como flúor, arsénico, vanadio y potenciales sustancias tóxicas provenientes del medio ambiente (plaguicidas, efluentes industriales, derivados del petróleo y otros), con una frecuencia en función de las variaciones observadas en los análisis parciales anteriores, pero por lo menos una a dos veces por año.

Una vez conocida su variación, las mediciones de los niveles de agua pueden reducirse de mensuales a bimestrales, pero en general esa pérdida de información no vale la pena ya que es una tarea de bajo costo.

##### **3.5.1.2. Control de Captaciones**

Debido a que del funcionamiento de las captaciones depende tanto la calidad del abastecimiento como la evolución del acuífero, las observaciones periódicas son más abundantes y en cada una de las captaciones consistiría en:

- Registro diario del caudal extraído y horas de funcionamiento.
- Análisis químicos parciales (como los del acuífero) y bacteriológicos semanales, o con la frecuencia fijada por la norma correspondiente o la autoridad competente.
- Análisis químicos completos, también como los del acuífero, cada tres a seis meses, según la evolución observada en los análisis anteriores o la frecuencia fijada por la norma correspondiente o la autoridad competente.

- Mediciones mensuales a trimestrales (como mínimo) del nivel dinámico, tomadas siempre en las mismas condiciones, preferentemente estacionarias.
- Mediciones semestrales del nivel estático, tomadas siempre en las mismas condiciones de recuperación del nivel.

Para permitir los controles descriptos, las perforaciones de explotación deben estar provistas de los siguientes elementos:

- Un grifo a la salida de la bomba para la toma de muestras de agua.
- Un orificio de acceso a la tubería de revestimiento provisto de un caño de 1" (mínimo  $\frac{3}{4}$ " ) de diámetro que penetre en el agua por debajo del nivel dinámico mínimo. La instalación de un manómetro puede resultar de utilidad; aunque sus lecturas no son muy precisas, por ejemplo para un ensayo de bombeo, permite una visualización rápida del nivel de agua.
- Un caudalímetro, preferentemente con totalizador, que permita lecturas del caudal instantáneas y del volumen total extraído.

### **3.5.2. Régimen Óptimo de Explotación**

Se trata de lograr un aprovechamiento racional del agua subterránea, es decir que satisfaga las necesidades del abastecimiento sin producir deterioros indeseables en los acuíferos y en el entorno. Por ello en la determinación del régimen de explotación más conveniente intervienen dos aspectos básicos: el funcionamiento de los pozos de producción, y la conservación de los recursos hídricos subterráneos.

#### **3.5.2.1. Funcionamiento de los Pozos de Producción**

Cuando a causa de una extracción excesiva, sea por el caudal y/o el tiempo de bombeo, el nivel dinámico en el pozo desciende hasta dejar descubierta parte de los filtros, la eficiencia y la vida útil del pozo pueden reducirse a través de dos mecanismos:

- aceleración de la corrosión y/o incrustación de los filtros;
- disminución de la permeabilidad del engravado y/o acuífero por entrapamiento de burbujas de aire.

Además, desde el punto de vista económico no es conveniente sobrepasar el caudal crítico de bombeo a fin de evitar una disminución de la eficiencia y un consiguiente aumento del costo de bombeo. Cuando por las exigencias de la demanda este caudal no puede ser respetado, dependerá de un análisis comparativo de costos si construir un pozo adicional o sobrepasar el caudal crítico (Helweg, O.J., 1982).

#### **3.5.2.2. Conservación de los Recursos Hídricos Subterráneos**

Al comenzar la explotación de un acuífero o sistema acuífero, se rompe el equilibrio natural del mismo, originando una serie de modificaciones en el (los) acuífero (s), como ser las alteraciones hidráulicas, químicas y de las reservas descriptas en el punto 6. Impacto Ambiental. Con respecto a las variaciones de las reservas, o sea desde el punto de vista hidrológico, la extracción no debería exceder la recarga media anual, lo que

puede ser observado por la permanencia de los niveles piezométrico en el tiempo, habida cuenta de las fluctuaciones naturales. Cuando el régimen hídrico de la región es suficientemente alto, en general el descenso de los niveles durante años secos puede recuperarse en períodos húmedos, por lo que una cierta sobreexplotación controlada puede realizarse si se tiene un conocimiento suficiente del acuífero y del régimen hídrico. A fin de conservar los recursos acuíferos, es necesario que la explotación se efectúe evitando, o por lo menos minimizando, esas modificaciones indeseables. La vía más conveniente para hallar el régimen óptimo de explotación, y generalmente la única más o menos precisa, es mediante un modelo matemático.

Como se habrá notado, la determinación del régimen óptimo está estrechamente vinculada al "caudal seguro" (safe yield), un concepto discutido y del cual no existe una definición universalmente válida y aceptada (ver 1. 6. 1). Además, su determinación casi nunca es ni inmediata ni sencilla, pero puede ser bien importante para lograr una vida útil aceptable de un sistema de captación de agua subterránea.

Un criterio adecuado para fijar el régimen óptimo de explotación podría ser el siguiente:

- Evitar un deterioro serio del acuífero que lo haga inutilizable para el consumo humano en el mediano o corto plazo; por ejemplo a causa de un avance de la interfaz agua dulce-agua salada, a la formación de conos de agua salada, al agotamiento de una lente de agua dulce, etcétera.
- Cuidar que el caudal anual extraído no exceda el orden de grandeza de la recarga media anual (reserva regulatriz) determinada; por ejemplo que se encuentre dentro del margen de error cometido en el cálculo de la recarga.
- Controlar la evolución del sistema acuífero durante la explotación y, si corresponde, efectuar los ajustes adecuados de la extracción y/o encarar obras de recarga artificial, recordando lo expresado más arriba con respecto a períodos secos y húmedos.

### **3.5.3. Rehabilitación de Perforaciones**

La conservación periódica de las propiedades específicas de los pozos permite prolongar su vida útil y mantener su rendimiento. Son varios los factores que pueden reducir su productividad: el desgaste de la bomba, un descenso de la superficie piezométrica, sea por causas naturales y/o la interferencia de nuevos pozos, la obstrucción del engravado y/o de la formación acuífera en la proximidad del filtro y la oclusión de este por corrosión, incrustación y/o acumulación de sedimentos en su interior.

Cuando el análisis de las mediciones de control evidencian que la causa es un problema del pozo en sí, o sea alguna de las obstrucciones mencionadas, su capacidad puede ser mejorada aplicando uno o varios de los siguientes métodos:

- Extracción del material acumulado en el fondo e interior de los filtros.
- Nuevo desarrollo de la perforación.
- Tratamiento con ácido.
- Limpieza con medios mecánicos.

## 4. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

### 4.1. DEFINICIÓN Y OBJETIVOS DE LA RECARGA ARTIFICIAL

Es el conjunto de acciones que producen un incremento local de la cantidad de agua que ingresa en los acuíferos, generalmente con el objetivo de mejorar la explotación de los mismos y comúnmente acompañado por una explotación controlada. En un sentido amplio no sólo comprende las obras planificadas y operadas a tal fin, sino también la recarga incidental que ocurre en otras actividades, por ejemplo irrigación agrícola, pérdidas de cañerías de agua y de cloacas, pozos ciegos, lagunas de aguas residuales, corrección de torrentes, etc.

Técnicas de recarga artificial del agua subterránea se han usado desde más de 200 años con una variedad de propósitos. Estos incluyen a los siguientes:

- Aumentar la cantidad de agua subterránea disponible.
- Reducir o eliminar el descenso del nivel de agua subterránea.
- Almacenar excedentes de agua superficial.
- Depurar el agua que se recarga por su permanencia prolongada en el subsuelo.
- Combatir la intrusión marina y/o la contaminación creando barreras hidráulicas apropiadas.
- Diluir las aguas existentes en el acuífero.
- Evacuar aguas residuales.
- Reducir la subsidencia del terreno por exceso de bombeo.
- Utilizar el acuífero como conducto de distribución de nuevas aguas, cuando ya existe una red apropiada de extracción.

Según Bourget (1971, en Custodio y Llamas, 1976), en cifras redondas, en el 75 % de los casos se pretende principalmente uno de los 4 primeros objetivos.

El agua comúnmente usada para recarga artificial comprende el caudal normal de los ríos, caudales de crecidas desviados, el escurrimiento pluvial o agua de enfriamiento industrial. En muchos lugares del mundo, los efluentes cloacales, generalmente con algún tratamiento, han servido como la fuente principal de agua de recarga. En los últimos tiempos el interés por esta última fuente se ha incrementado, tanto por razones técnicas como económicas, porque en vez de ser desechadas reciben un tratamiento exitoso en los sistemas de recarga en superficie para su reutilización a través del agua subterránea.

El tipo de sistema de recarga artificial que puede ser construido en un cierto lugar, depende en gran medida de las condiciones geológicas e hidrogeológicas de ese lugar. Además de consideraciones económicas, en la selección del sitio y del método de recarga intervienen por lo menos los siguientes aspectos:

- Fuente del agua de recarga.
- Características químicas y físicas del agua de recarga.
- Disponibilidad de un acuífero apto para recarga artificial.
- Espesor y permeabilidad del material sobreyacente al acuífero.
- Espesor, permeabilidad y porosidad del acuífero.
- Características químicas del agua del acuífero.
- Proximidad del sitio de recarga al cono de depresión de los pozos de explotación;
- Diferencia entre los niveles de agua en el acuífero y en el dispositivo de recarga;
- Topografía.
- Propiedad del terreno.

## 4.2. MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL

En primer lugar debe distinguirse entre recarga inducida o indirecta y recarga artificial propiamente dicha.

La **recarga inducida** se logra creando condiciones más favorables para la infiltración natural. El método más importante es la sobreexplotación controlada de un acuífero junto a un río o lago, provocando un gradiente hidráulico del agua superficial a la captación de agua subterránea para producir una mayor afluencia de agua. La percolación del agua superficial a través de los sedimentos aluviales del valle produce una mejora en la calidad del agua. El factor controlante, además de la cantidad y calidad del agua superficial, es la permeabilidad de los sedimentos aluviales y de los depósitos en el fondo del río o lago. Este sistema es muy común en Europa, donde desde muchas décadas la explotación se hace mediante drenes, pozos verticales o pozos de drenes radiales. Construidos junto a un río y en los depósitos aluviales acumulados por el mismo en su valle.

Otros métodos pueden consistir en preparar superficies de forma adecuada, como creación de terrazas, acondicionamiento de cauces de río, etc.

La recarga artificial propiamente dicha consiste en construir dispositivos especialmente diseñados para ese fin. Estos pueden clasificarse en:

- 1). Sistemas de recarga en superficie.
- 2). Sistemas de recarga en profundidad.
- 3). Sistemas mixtos, compuestos por elementos de los dos sistemas.

#### 4.2.1. Sistemas de Recarga en Superficie

Son útiles en casos de acuíferos libres y en la ausencia de capas poco permeables próximas a la superficie.

Consisten en extender el agua cubriendo una gran superficie de terreno a través de la cual puede infiltrarse. Los principales factores que controlan la cantidad de recarga artificial son:

- Tiempo de contacto del agua con el suelo.
- Permeabilidad del suelo y subsuelo.
- Extensión de la superficie inundada.

Algunos de los métodos de recarga artificial son los siguientes:

**Inundación.** Requiere terrenos de pendiente muy suave o casi horizontales y de considerable extensión. Por ellos se hace fluir una delgada lámina de agua, manteniendo la velocidad al mínimo para reducir la erosión. El excedente de agua se recolecta agua abajo del campo para su evacuación o retorno al sistema.

**Irrigación.** El agua no consumida por las plantas puede agregar considerables cantidades de agua al reservorio subterráneo, especialmente cuando existe sobre-irrigación y/o en la época en que no se produce crecimiento vegetal.

**Zanjas y surcos.** Consiste en hacer circular el agua por surcos que siguen suavemente la pendiente del terreno. Pueden irse ramificando arborescentemente a partir de un canal de alimentación o tener una zanja central y una serie de surcos laterales oblicuos a la misma. Terminan en un canal colector para evacuar el agua no infiltrada, a fin de mantener una velocidad de circulación tal que no permita la sedimentación del material fino en suspensión. Probablemente sea el método más sencillo, pero presenta el inconveniente de necesitar una gran superficie ya que solamente un 10 a 20 % de ella es inundada.

**Piletas.** Son probablemente los dispositivos de infiltración más frecuentes, debido tanto a su sencillez de construcción y mantenimiento como al buen aprovechamiento del terreno disponible. Pueden construirse excavando el terreno o levantando pequeñas presas en superficie. Son poco profundas y su superficie comúnmente varía entre una fracción de hectárea y unas 10 ha. El caudal de recarga está relacionado directamente a la permeabilidad de los materiales entre el piso de la piletas y la superficie freática.

**Fosas.** Cuando los horizontes superficiales son de permeabilidad demasiado baja y el nivel freático es relativamente profundo, la recarga artificial puede efectuarse mediante fosas. Son estas simples excavaciones que atraviesan las capas de baja permeabilidad y penetran considerablemente los materiales permeables subyacentes, como si fueran piletas donde la profundidad es importante en relación a las otras dimensiones. Muchas veces se han aprovechado excavaciones preexistentes, por ejemplo canteras. Su ventaja, además de atravesar zonas poco permeables, reside en que son fáciles y económicas de construir y requieren relativamente poco mantenimiento. Esto último debido a que la colmatación por sedimentación se produce en el fondo mientras las paredes continúan infiltrando.

#### **4.2.2. Sistemas de Recarga en Profundidad**

Estos son esencialmente los pozos verticales, aunque también se emplean pozos de drenes radiales. Los pozos de recarga son necesarios para alcanzar acuíferos profundos y cuando el subsuelo está constituido por una alternancia de horizontes permeables e impermeables. En muchos aspectos son similares a los pozos de abastecimiento de agua, excepto que el agua es inyectada en vez de extraída. Son entubados hasta el acuífero y con filtros en éste. A veces varias cañerías son instaladas en una misma perforación permitiendo la recarga de varios acuíferos al mismo tiempo.

En comparación con otros métodos de recarga artificial, los pozos generalmente son más costosos, tanto en su construcción como en su mantenimiento. Excepto en acuíferos muy permeables (gravas limpias, calizas cársticas, basaltos fisurados, etc.) su mayor desventaja, fuera del costo, es su tendencia a la colmatación por la acumulación de sedimentos finos y reacciones químicas y biológicas en el acuífero adyacente al pozo. De ahí que la calidad del agua de inyección sea de primerísima importancia.

Sus ventajas principales son su capacidad de alcanzar acuíferos profundos debajo de capas impermeables y sus reducidas necesidades de espacio.

El sistema de los pozos de recarga es el que frecuentemente se usa para una variedad de fines diferentes del mejoramiento de los acuíferos, como ser la recuperación secundaria de petróleo, evacuación de líquidos residuales y drenaje.

#### **4.2.3. Sistemas Mixtos de Recarga**

Como el mayor problema de los sistemas superficiales es la presencia de horizontes poco permeables en el subsuelo y el de los pozos de recarga la pureza del agua de recarga, un sistema mixto podría ser la solución de ambos.

Un sistema mixto propiamente dicho utiliza el primer acuífero como filtro y un segundo como receptor final. El agua es infiltrada mediante piletas a un primer acuífero y los pozos la captan en éste y la conducen al segundo. Cuando el primer acuífero es de poco espesor, la captación también puede efectuarse mediante drenes del tipo agrícola, lo que permite por ejemplo solucionar el problema de la formación de un acuífero colgante entre la pileta de infiltración y el acuífero freático.

Un método diferente consiste en combinar pozos de recarga con fosas rellenas de grava. Esta actúa así como prefiltro y puede fácilmente ser reacondicionada cuando se colmata, pero su efecto filtrante es menor que la de un suelo natural, especialmente en el aspecto químico y biológico.

### **4.3. OTROS ASPECTOS DE LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS**

Para todos los demás temas vinculados a la recarga artificial de acuíferos, como ser Aspectos Hidráulicos, Funcionamiento de los Sistemas de Recarga, Calidad del Agua, Recuperación y Reutilización del Agua Recargada, etc. se aplican perfectamente los principios expuestos en la sección 6.5. "Cuerpos Receptores Subterráneos" de las Normas de Estudio, criterios de diseño y Presentación de Proyectos de Desagües

Cloacales” (CoFAPyS). Con respecto a la utilización de aguas residuales para una recarga artificial, cabe señalar la importancia de tener en cuenta los dos conceptos básicos indicados en el documento mencionado: "reuso de agua residual para recarga de agua subterránea" y “recarga de agua subterránea para reuso de agua residual”. Como ahora se trata de mejorar la disponibilidad de agua subterránea para consumo humano, obviamente se ha de aplicar el primero de ellos, o sea infiltrar agua con un considerable grado de tratamiento.

## 5. ÁREAS DE PROTECCIÓN

A raíz de su origen y ocurrencia, el agua subterránea por naturaleza generalmente no contiene sustancias nocivas para la salud y se encuentra a prueba de una contaminación directa, por lo cual constituye la mejor fuente de abastecimiento de agua potable (DVGW, 1995). No obstante se encuentra expuesta a una serie de fuentes artificiales de contaminación como ser tanques sépticos, pozos ciegos, rellenos sanitarios, sistemas de tratamiento de efluentes municipales, pozos de inyección de residuos líquidos, depósitos de productos químicos, cementerios, desechos mineros, salmueras petroleras, agroquímicos, y vuelcos accidentales de lubricantes, combustibles y productos químicos (Bouwer, 1978). Es por ello que su calidad merece ser protegida, cuando es utilizada para abastecimiento público, ya que no todos los especialmente contaminantes pueden ser removidos por tratamientos posteriores y/o éstos, una vez en funcionamiento, pueden no ser efectivos frente a un inesperado nuevo contaminante.

Además, aún cuando un contaminante nuevo sea detectado a tiempo en el área de protección antes de alcanzar la captación, la extracción del mismo mediante técnicas de remediación de acuíferos es muy lenta y costosa.

Para lograr esa conservación de su calidad, una captación de agua subterránea necesita estar acompañada por un área de protección, es decir, una zona alrededor de ella en la que se toman las medidas necesarias para evitar una contaminación del agua a ser extraída. Son tres las amenazas globales a la calidad del agua subterránea que pretende eliminarse con el establecimiento de un área de protección:

- La introducción directa de contaminantes en el área contigua a la captación a través de entubamientos inadecuados, desagüe pluvial de rutas, vuelcos accidentales, etcétera.
- La contaminación por bacterias y virus.
- La contaminación por la amplia gama de sustancias químicas, tanto inorgánicas de origen natural como orgánicas sintéticas.

En correspondencia a estos riesgos, es común que un área de protección sea subdividida en tres zonas, a saber: la Zona 1 inmediatamente alrededor de las instalaciones, generalmente propiedad de la empresa de agua; un perímetro cercano, la Zona 2, destinada principalmente a brindar protección contra gérmenes patógenos y una zona exterior contra contaminantes de larga vida, principalmente químicos no o difícilmente degradables, y radioactivos.

Las áreas de protección existentes en Europa y en Estados Unidos generalmente apuntan a lograr una de las siguientes metas globales de protección, aunque también pueden combinar más de una:

- Establecer una zona de remediación para proteger los pozos de la aparición de un contaminante inesperado.
- Establecer una zona de atenuación a fin de llevar la concentración de un contaminante específico existente en el subsuelo a un nivel aceptable durante el tiempo que tarda en llegar al pozo.

- Establecer una zona de restricción en toda o una parte del área de captación actual o futura del pozo.

La creación de áreas de protección, aunque técnicamente clara, ofrece ciertas dificultades socioeconómicas y legales, ya que supone el establecimiento de servidumbres en terrenos ajenos y una interferencia con la propiedad vecina en beneficio del usuario del pozo; si dicho usuario es un ente público la solución puede ser más sencilla que si se trata de una empresa privada, aunque su fin sea el abastecimiento público. El problema se agrava en zonas con elevada densidad de población y en zonas urbanas. Por otro lado el control de las actividades prohibidas o reglamentadas no es fácil, ni tampoco lo es la aplicación de las normas (Custodio et al, 1976).

## 5.1. ALGUNOS ASPECTOS DE HIDROGEOLOGÍA Y DE CONTAMINANTES

### 5.1.1. Hidrogeología

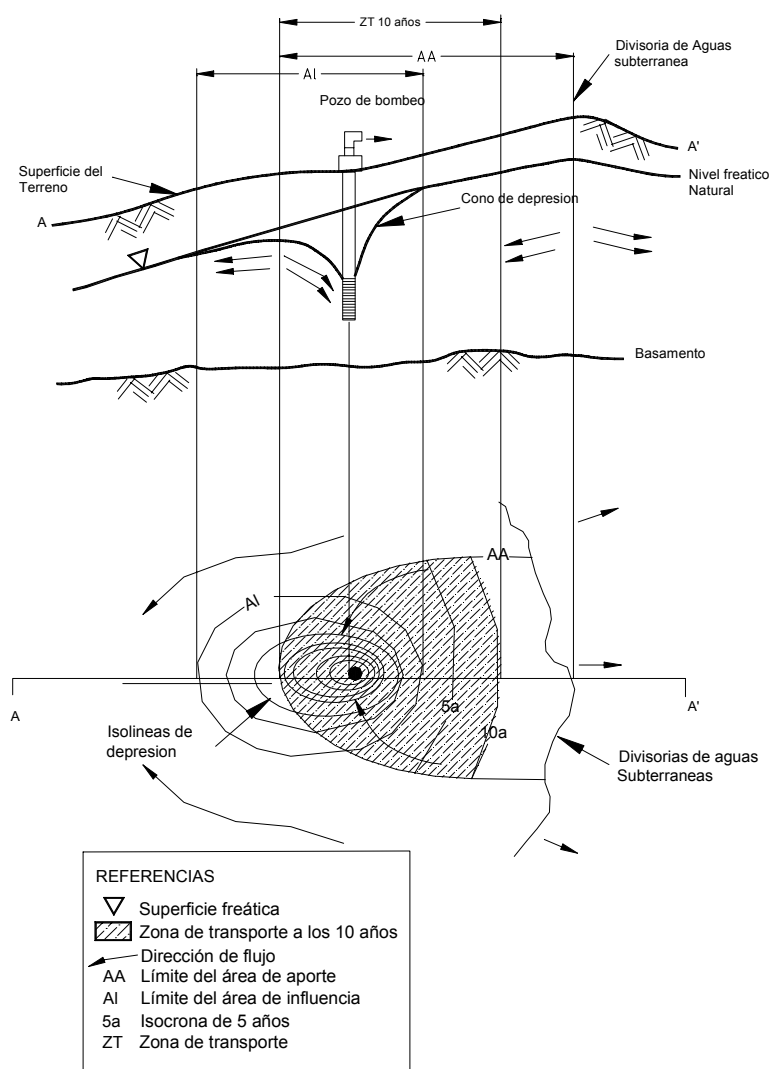
Cabe señalar dos conceptos hidrogeológicos importantes vinculados a este tema: el de “área de influencia” y el de “área de aporte” o de “captación”. El primero es la zona alrededor de una captación afectada por la depresión del nivel piezométrico, o sea el cono de depresión, y el segundo se refiere a toda la extensión del acuífero que aporta agua a la captación o, en términos hidráulicos, el área en el cual las líneas de flujo convergen en la captación. Las dos son coincidentes solamente cuando la superficie piezométrica natural es horizontal. Como eso normalmente no ocurre, sólo un sector del área de influencia está contenido en el área de aporte, extendiéndose éste aguas arriba hasta la divisoria de agua subterránea, más allá del cono de depresión, o sea abarcando todo el área de recarga del pozo (ver **Figura 23**). A medida que continúa el bombeo, el agua que llega al pozo es transportada cada vez de más lejos, pudiendo distinguirse dentro del área de captación zonas hipotéticas de transporte de las partículas de agua, o de contaminantes. El tiempo que tarda una partícula en viajar desde un punto del área de aporte al pozo de bombeo se denomina “tiempo de tránsito” y se puede identificar por líneas de igual valor de ese tiempo llamadas “isocronas”. El área dentro de las isocronas son las “zonas de transporte”. Una zona de transporte grande (correspondiente a un alto valor del tiempo de tránsito) significa una mayor protección del pozo.

### 5.1.2. Contaminantes

Entre los muchos diferentes tipos de contaminantes existentes, aquellos de más interés son las sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, bacterias y virus. A fin de poder entender los criterios de protección tratados en el capítulo siguiente, es necesario conocer algunas propiedades principales de estos contaminantes que afectan su persistencia y movilidad.

**Sustancias químicas inorgánicas.** Algunos de los contaminantes más comunes y móviles resultan de la incorporación de sustancias químicas inorgánicas al agua subterránea. Compuestos tales como nitratos, amonio, sodio y cloruros muchas veces causan problemas persistentes debido a su alta solubilidad. Por ejemplo una contaminación con nitratos procedentes de cloacas y de prácticas agrícolas se presenta en grandes áreas de muchos acuíferos poco profundos; por otra parte intrusiones de agua salada han degradado recursos de agua subterránea sujetos a sobreexplotación.

La distribución de contaminantes inorgánicos dentro del acuífero se efectúa principalmente por advección, es decir mediante el flujo del agua subterránea. El mecanismo más efectivo para reducir la concentración en el agua subterránea son la dispersión y dilución. Entre los contaminantes inorgánicos más comunes de efluentes municipales, los metales pesados son rápidamente atenuados durante su movimiento a través de arcillas. Aunque ciertos metales pueden persistir en el agua subterránea durante períodos largos, su movilidad es en general menor que la de otros compuestos inorgánicos tales como nitratos y cloruros. Esto es debido a la relativamente baja solubilidad de muchos metales en las condiciones del agua subterránea y a su tendencia a ser adsorbidos en minerales de arcilla, hidróxido de hierro y de manganeso y en materia orgánica. La solubilidad y movilidad de metales es generalmente controlada por la solubilidad de sus bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos.



**Figura 23.** Aspectos hidrogeológicos de un área de protección

**Sustancias químicas orgánicas.** Si bien en el subsuelo existen muchos compuestos orgánicos de forma natural, el efecto de ciertos compuestos químicos orgánicos sintéticos en la calidad del agua subterránea es motivo de preocupación. Estos productos químicos incluyen, entre otros, solventes, pesticidas, e hidrocarburos sintéticos.

Los productos químicos orgánicos pueden ser removidos del agua subterránea de varias maneras. Reacciones químicas, actividad de microbios y cometabolismo o bien reducen la concentración, o metabolizan y destruyen los productos químicos por transformación o consumo.

El ritmo de degradación es influenciado por factores tales como el volumen del contaminante, su solubilidad en agua, temperatura, pH., contenido de oxígeno, disponibilidad de ciertos materiales orgánicos e inorgánicos y el carácter del sedimento. La descomposición por microorganismos es más activa en el suelo y en acuíferos freáticos aeróbicos poco profundos.

De todas maneras la descomposición es más lenta en el agua subterránea que en el suelo y en consecuencia productos químicos orgánicos pueden ser bien persistentes una vez que se encuentran en el agua subterránea. Por ejemplo el pesticida DBCP tiene una vida media de aproximadamente 10 semanas en el suelo y hasta 28 a 140 años en el agua subterránea (USEPA, 1987).

Un problema adicional es el llamado "transporte facilitado"; contaminantes que habían sido considerados relativamente inmóviles, tales como dioxina y metales, han sido encontrados a grandes distancias de su origen. Aparentemente solventes orgánicos, coloides y macromoléculas facilitan el movimiento de algunos contaminantes, permitiéndoles dispersarse más rápidamente que la velocidad real media del agua subterránea.

**Bacterias y virus.** La supervivencia de microorganismos patógenos en el subsuelo (por ejemplo bacterias parasitarias y productoras de enterotoxinas) ha sido durante muchas décadas una preocupación clave para la salud pública con relación al agua potable. En el subsuelo las bacterias alóctonas usualmente son eliminadas, en general más rápidamente que sustancias químicas orgánicas. En un medio rico en oxígeno las bacterias pueden sobrevivir por periodos relativamente largos (más de seis meses) tanto en la parte profunda de la zona vadosa como en un acuífero freático.

La eliminación de patógenos se produce por el efecto combinado de las condiciones físicas, biológicas y químicas que existen en un lugar; la disponibilidad de nutrientes y algunos factores biológicos son de la mayor importancia para la supervivencia de bacterias patógenas. La eliminación es más rápida a temperaturas elevadas (37 °C), a valores de pH alrededor de 7, con baja concentración de oxígeno y con altos niveles de carbono orgánico. Bajo estas condiciones las bacterias naturales son activadas y actúan en forma antagonista hacia los microorganismos patógenos.

La eliminación de las diferentes especies microbianas ocurre en forma específica para cada una de ellas. Por ejemplo bacterias Coliformes son eliminadas en un 99,9 por ciento en menos de ocho días, mientras que para la *Escherichia Coli* lleva 50 días alcanzar el mismo nivel de eliminación. Bajo ciertas condiciones y a temperaturas inferiores a 15 °C, la *Salmonella typhi* puede sobrevivir más de 100 días, la *Salmonella typhimurium* aproximadamente 230 días y la *Yersinia sp.* aproximadamente 200 días (Matthess y Pekdeger 1981, en USEPA 1987).

Los factores que controlan la supervivencia y la migración de virus una vez que han sido introducidos en el ambiente subterráneo, son en general el clima, el contenido de arcillas, la humedad y el tipo de virus. Los virus pueden emigrar distancias considerables en el subsuelo; se han observado profundidades de penetración tan altas como 67 metros y migraciones horizontales de 408 metros (USEPA, 1987).

En el agua subterránea la única variable que parece estar vinculada a la supervivencia de algunos virus examinados fue la temperatura. A las temperaturas característicamente bajas del agua subterránea, Poliovirus 1 y Enchovirus 1 persistieron durante períodos largos, hasta 29 días, antes de alcanzar una reducción significativa; el 0,1% de Poliovirus, Hepatitis virus o Enterovirus puede sobrevivir después de 140 días en el agua subterránea, considerablemente más que la supervivencia de la bacteria Escherichia Coli. Bajo condiciones favorables y a temperaturas menores a 15 °C, el Poliovirus puede sobrevivir por más de 250 días (USEPA, 1987).

Basado en estos y otros resultados similares de extensivos estudios de campo, en Europa ha sido recomendado un tiempo de permanencia de por lo menos 50 a 60 días, y donde sea posible un año, para proteger los pozos de una contaminación por bacterias y virus y además, a causa de factores dependientes de la escala, una distancia mínima de 100 metros, independientemente del tiempo de permanencia en subsuelo (USEPA, 1987).

## **5.2. CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE ÁREAS DE PROTECCIÓN**

Para ser efectiva, la delimitación de áreas de protección debe estar basada en los diversos factores que influyen en la probabilidad de que una contaminación llegue a los pozos de abastecimiento. Los principales factores o criterios técnicos, muchos de ellos usados tanto en Europa como en Estados Unidos, son los siguientes:

- Distancia.
- Depresión.
- Tiempo de tránsito.
- Límites de flujo.
- Capacidad de asimilación.

Además del criterio conceptual en sí, también se necesita fijar, para cada uno de ellos, un “valor límite”, que representa el umbral por debajo o por encima del cual el criterio respectivo deja de producir el efecto de protección deseado.

En la elección del criterio y de su valor límite a ser utilizados para la definición de un área de protección influyen tres aspectos básicos:

- Las tres metas globales de protección anteriormente señaladas (zona de remediación, atenuación de contaminantes y zona de restricción).
- Factores técnicos; principalmente la aptitud para ser aplicado a las características hidrogeológicas del lugar, como ser ubicación de los límites del acuífero, extensión

del confinamiento, grado de consolidación, cantidad de fracturación y existencia de canales de disolución.

- Aspectos del plan de acción, como ser facilidad de comprensión por parte del público, costo de implementación, capacidad de ser defendible en litigios, posibilidad de ser ejecutado en etapas y otros.

Muchas veces estos últimos conducen a la elección de un criterio técnico simple, como por ejemplo la distancia, en vez de otro más eficiente pero de realización más compleja, o por lo menos hasta tanto se pueda aplicar el más sofisticado.

### **5.2.1. Distancia**

El criterio distancia se basa en el concepto de delimitar un área de protección usando un radio u otra dimensión medida desde un pozo de bombeo hasta el punto en cuestión. Es la forma más directa de delimitación, pero presenta la desventaja de no incorporar directamente ni el movimiento del agua subterránea ni el transporte de contaminantes. Como consecuencia la resultante área de protección puede ser insuficiente o ineffectiva, lo cual muchas veces puede ser consecuencia de tratar de establecer un área de protección con recursos demasiado limitados.

La elección de este criterio comúnmente es una decisión arbitraria, basada en experiencias anteriores con algún control de contaminación del agua subterránea. Frecuentemente también ha sido seleccionado como primer paso en la definición de un área de protección, ofreciendo por supuesto una considerable ventaja con respecto a la ausencia de tal área. Igualmente ha sido usado para una delimitación genérica de zonas de protección bacteriana y para alejar la aplicación de pesticidas.

### **5.2.2. Depresión**

Significa utilizar como criterio la extensión hasta la cual el bombeo de un pozo hace descender la superficie freática de un acuífero libre o la superficie piezométrica de un acuífero confinado. Es decir, este criterio aplica el concepto frecuentemente usado del cono de depresión o área de influencia. Como resultado de la depresión creada por un bombeo, el gradiente hidráulico y la velocidad de escurrimiento se incrementan, acelerando en consecuencia el movimiento del agua subterránea y la migración de un eventual contaminante hacia el pozo. La extensión de un área de influencia puede variar enormemente, desde algunas decenas de metros en acuíferos freáticos altamente productivos a decenas de kilómetros en acuíferos confinados regionales.

La forma de proteger el pozo es delinear el límite del área de influencia. Eso puede efectuarse seleccionando un valor límite pequeño para la depresión y luego determinar las distancias de los pozos a los puntos donde este criterio se satisface. Cuando la superficie piezométrica o freática de un acuífero es casi horizontal, el cono de depresión prácticamente coincide con el área de aporte y entonces la protección sobre la base del cono de depresión es prácticamente equivalente a la que se obtendría protegiendo el área de captación completa. Sin embargo, la situación más común de una superficie freática o piezométrica inclinada, implica una diferencia potencialmente grande entre el área de influencia y el de captación y la elección de la primera en muchos sitios puede conducir a una protección inapropiada.

### 5.2.3. Tiempo de Tránsito

Es éste un criterio basado en el tiempo máximo que tardaría un contaminante del agua subterránea en llegar al pozo. Conceptualmente incorpora una evaluación más completa de los procesos físicos que gobiernan al transporte de contaminantes que los otros criterios mencionados. De todos estos procesos físicos, la advección es el mejor entendido y por eso los cálculos del tiempo de tránsito para la delimitación de áreas de protección generalmente se han realizado sobre esta base. Si sólo se considera la advección, el tiempo que necesita un contaminante en llegar al pozo no sólo estaría afectado por la distancia hacia el mismo, sino también por el incremento del gradiente hidráulico en las cercanías del pozo.

Para la mayoría de las baterías de pozo, especialmente aquellas donde la velocidad del escurrimiento es relativamente alta, la advección controla la mayor parte del movimiento de contaminantes hacia los pozos. En acuíferos con velocidades altas, los contaminantes probablemente se desplazan rápidamente hacia los pozos, y la selección de valores límites relativamente altos del tiempo de tránsito para delimitar el área de protección, puede implicar distancias demasiado grandes para poder ser llevadas a la práctica. Para acuíferos con bajas velocidades, otros procesos físicos también deben ser tenidos en cuenta, por ejemplo la dispersión. En las condiciones mencionadas, ésta puede llegar a ser importante, causando una llegada más rápida de un contaminante al pozo que la predicha por el tiempo de tránsito exclusivamente hidráulico. Además el proceso de "transporte facilitado" puede reducir aún más el tiempo de tránsito real de un contaminante al pozo. De ahí que el trazado de áreas de protección con valores bajos de tiempo de tránsito, basados en el flujo de agua subterránea no contaminada, pueda resultar problemático.

Obviamente el tiempo de tránsito es función de la velocidad real global del agua subterránea, la cual varía enormemente de un ambiente hidrogeológico a otro. Los ejemplos conocidos muestran que hay una gran similitud entre las velocidades en los diferentes tipos de acuíferos de porosidad granular y que los medios de alta velocidad, como ser acuíferos kársticos, conglomerados de bloques y rocas volcánicas fracturadas, funcionan como canales o tubos de flujo. En ambientes geológicos con estas velocidades altas, los tiempos de tránsito son muy cortos, a veces de horas, días o semanas en vez de años como en acuíferos granulares con flujo laminar. Sean confinados o libres, los ambientes acuíferos de alta velocidad de flujo requieren criterios especiales, distintos a los apropiados para medios granulares, consolidados o sueltos.

### 5.2.4. Límites de Flujo

El criterio de delimitación de un área de protección sobre la base de límites de flujo aplica el concepto de usar determinada ubicación de divisorias de agua subterránea y/o otros rasgos físicos/hidrológicos que controlan el flujo del agua subterránea. Significa proteger el área de aporte de un pozo bajo la suposición de que con el gradiente hidráulico existente, un contaminante ingresando a este área probablemente llegue al pozo. Ejemplos de rasgos superficiales que en algunos ambientes hidrogeológicos actúan como barreras de flujo son serranías, ríos, canales y lagos; los límites de un acuífero y una divisoria regional de agua subterránea constituyen ejemplos de rasgos subterráneos. Con respecto a cuerpos de agua superficiales cabe señalar que a causa de un bombeo puede existir escurrimiento de agua subterránea por debajo de ellos, y en esta situación el criterio de límite de flujo no es aplicable.

Este criterio es especialmente útil en sistemas acuíferos pequeños, donde el tiempo de tránsito desde los límites puede ser muy breve, o donde el cono de depresión de un pozo rápidamente alcanza los límites físicos del acuífero. Acuíferos de extensión moderada a grande, con distancias entre límites de decenas a cientos de kilómetros, pueden ser menos aptos para la aplicación de este criterio, debido al problema de establecer una protección en superficies geográficas muy grandes; sin embargo pueden existir excepciones, tal como un pozo situado relativamente cerca de esos límites. Este criterio también puede utilizarse para una delimitación inicial de áreas de protección en acuíferos fracturados y kársticos.

### **5.2.5. Capacidad de Asimilación**

El concepto de este criterio es utilizar la capacidad que tienen las zonas saturadas y/o no saturadas de una formación de reducir las concentraciones de contaminantes a niveles aceptables antes de alcanzar el pozo, aunque no se conocen ejemplos de su aplicación para establecer área de protección para un rango amplio de contaminantes. La existencia y cinemática de procesos de atenuación están estrechamente vinculadas a contaminantes específicos y a la composición y las condiciones del suelo y del acuífero, y su determinación cuantitativa y modelación no son sencillas. En consecuencia este criterio generalmente ha sido considerado como demasiado complejo e incierto para la delimitación de un área de protección. Donde la contaminación está limitada a uno o dos tipos de contaminantes se han realizado algunos análisis de la capacidad de atenuación; por ejemplo con respecto al aporte de nitratos de cámaras sépticas en algunas comunidades del nordeste de los Estados Unidos y en la protección contra el pesticida Aldicarb en el estado de Florida.

### **5.2.6. Ejemplos de Valores Límites**

A título ilustrativo se indican a continuación algunos valores límites de los diferentes criterios utilizados en el establecimiento de áreas de protección contra la contaminación por productos químicos (la más persistente):

- Tiempo de tránsito: 5 a 50 años en el acuífero; menos de cinco años en ambientes con alta velocidad de escurrimiento.
- Distancia: 300 metros a más de 3 kilómetros.
- Depresión: 3 a 30 centímetros.
- Límites de flujo: físicos e hidrológicos.

## **5.3. MÉTODOS DE DISEÑO**

Se describen aquí las diferentes técnicas empleadas para transformar el criterio y su valor límite elegidos, en un límite real representado en un mapa. De acuerdo a USEPA (1987), las técnicas empleadas en diversos proyectos de áreas de protección en los Estados Unidos y en Europa occidental corresponden a seis métodos básicos, los que enumerados en orden creciente de sofisticación técnica son los siguientes:

- Radio fijo arbitrario.
- Radio fijo calculado.
- Formas variables simplificadas.
- Métodos analíticos.
- Relevamiento hidrogeológico.
- Modelos matemáticos.

Como en el caso de la selección de los criterios, elegir un método de diseño depende de varias consideraciones técnicas y del plan de acción, aunque la elección del método está más atada a la exactitud deseada de la delimitación y a los recursos financieros disponibles que a las metas globales de protección. Los factores técnicos a ser tenidos en cuenta son principalmente:

- Tipo, cantidad y disponibilidad de los datos requeridos.
- Aptitud del método a ser aplicado a las condiciones hidrogeológicas del lugar.
- Precisión y representatividad de los límites determinados con relación a las condiciones reales de campo.

Cabe señalar que en el diseño de un área de protección puede usarse más de un método.

### **5.3.1. Radio Fijo Arbitrario**

Significa trazar un círculo de un radio especificado alrededor de la perforación a ser protegida. El radio suele ser un valor de distancia arbitrariamente elegido, pero también puede estar basado en consideraciones hidrogeológicas muy generales y/o juicio profesional. Por ejemplo, el valor límite seleccionado para el criterio de distancia, es decir el radio o conjunto de radios, puede estar basado en un promedio de distancias correspondientes a valores límites del tiempo de tránsito en varios ambientes hidrogeológicos.

Este método es una técnica sencilla para aplicar el criterio de distancia, normalmente muy barato y requiriendo relativamente poca pericia técnica. Permite delinear en un tiempo relativamente corto las áreas de protección de un gran número de pozos. La protección puede ser efectiva si se eligen altos valores límites, compensando así en algo la falta de tecnología hidrogeológica. El método también puede ser utilizado para una definición inicial de áreas de protección hasta tanto una técnica más sofisticada pueda ser adoptada, sea cuando crezca la necesidad de una protección más precisa o cuando se encuentre disponible más información hidrogeológica. Su desventaja reside en que su alto grado de incertidumbre complica la aplicación, debido a la falta de criterio científico en la determinación de los valores límites. Esto es particularmente cierto en áreas de características hidrogeológicas heterogéneas o donde existen importantes límites hidrológicos, tendiendo entonces a sobre- o sub-proteger las áreas de recarga de los pozos. No obstante, si se eligen valores límites altos (tal vez tres o más kilómetros), este método puede proporcionar una protección significativa en la mayoría de los lugares.

### 5.3.2. Radio Fijo Calculado

La delimitación de un área de protección usando este método implica dibujar un círculo con radio igual a un cierto valor límite, por ejemplo el tiempo de tránsito o la depresión. El radio se calcula usando una ecuación basada en el volumen de agua que por el bombeo va a ser llevada al pozo en un tiempo especificado. Los datos requeridos por la ecuación incluyen el caudal del pozo y los parámetros hidráulicos del acuífero tales como porosidad eficaz y conductividad hidráulica. El período de tiempo utilizado es aquel que se considere adecuado para permitir la depuración de una contaminación del agua subterránea antes de alcanzar el pozo, o una adecuada dilución o dispersión de los contaminantes.

El método es fácil de aplicar, relativamente económico y requiere una cantidad limitada de pericia técnica. Además, en poco tiempo pueden delinearse áreas de protección para un gran número de pozos. Conceptualmente ofrece un incremento significativo de exactitud con respecto al método de radio fijo arbitrario. Su desventaja radica en que aún así su exactitud es baja, especialmente en áreas con una hidrogeología heterogénea y anisótropa y con importantes límites hidrológicos.

### 5.3.3. Formas Variables Simplificadas

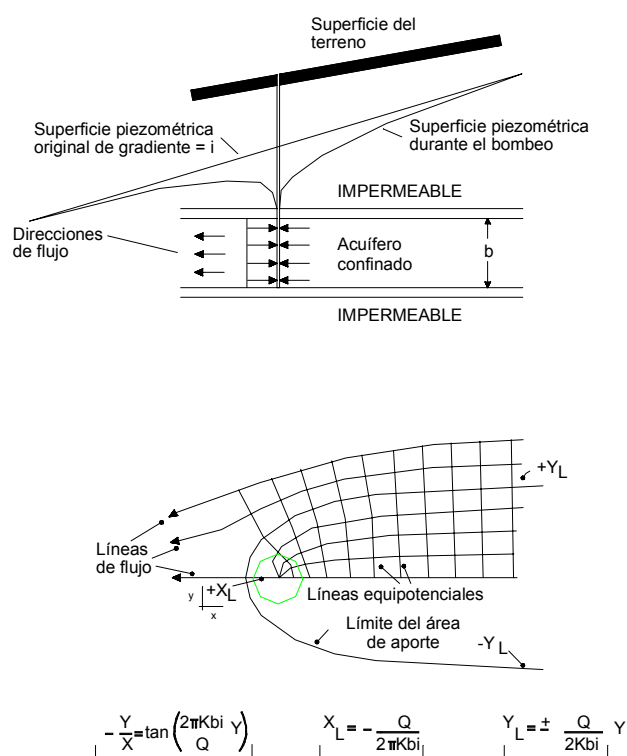
Consiste en generar "formas tipo" mediante métodos que usan los criterios de límites de flujo y tiempo de tránsito. Este método intenta simplificar la implementación seleccionando unas pocas formas representativas del gran conjunto de posibilidades potenciales. Para cada caso se elige entonces una "forma tipo" correspondiente a condiciones hidrogeológicas y de bombeo iguales o semejantes a las del pozo a proteger y se la ubica alrededor del pozo, orientada de acuerdo a la dirección de flujo del agua subterránea. Para determinar las formas tipo, primero se calcula la distancia al punto de culminación aguas abajo y el ancho lateral del área de aporte del pozo y luego su extensión aguas arriba mediante el criterio de tiempo de tránsito. Esto se realiza para diferentes condiciones hidrogeológicas y para varios caudales de bombeo dentro de cada una de ellas.

Presenta la ventaja de que, una vez calculadas las formas tipo, su implementación es bastante sencilla, requiriendo para su trazado final una cantidad relativamente reducida de datos de campo y de pericia técnica. Generalmente la única información necesaria para aplicar las formas a un pozo o una batería de pozos en particular, con las formas tipo ya calculadas, son el caudal de bombeo, el material del acuífero y la dirección del escurrimiento subterráneo. En esta situación el método ofrece un análisis más refinado que los de radio fijo y generalmente con un costo sólo ligeramente superior.

El método posiblemente no sea preciso en zonas con muchas heterogeneidades geológicas y límites hidrológicos. También aparecen algunos problemas conceptuales cuando la dirección de flujo del agua subterránea en las cercanías del pozo difiere de las inferidas del esquema regional, y por supuesto si las condiciones hidrogeológicas del lugar no concuerdan con las subyacentes al cálculo de la forma tipo utilizada. Los costos iniciales para desarrollar las formas tipos para una región extensa pueden ser relativamente altos, sobre todo si la variedad de condiciones hidrogeológicas es grande. Tanto el desarrollo de las formas tipo como la determinación de las direcciones de flujo alrededor de cada pozo, si éstas son desconocidas, requieren una considerable cantidad de información.

### 5.3.4. Métodos Analíticos

Con estos métodos las áreas de protección son determinadas mediante ecuaciones que definen el flujo del agua subterránea y el transporte de contaminantes que lo acompañan, usualmente las de régimen estacionario en un acuífero con flujo uniforme. Utilizan el caudal y los parámetros hidráulicos para calcular la distancia a la divisoria aguas abajo, o punto de culminación, y el ancho del área de aporte del pozo, tal como se indica en la **Figura 24**. La extensión del área de protección aguas arriba, o sea en sentido contrario a la dirección de flujo del acuífero, puede entonces determinarse con el criterio de tiempo de tránsito y/o el de límites de flujo (por ejemplo la ubicación de un límite hidrogeológico, tal como una divisoria de agua subterránea, o un contacto litológico). de el utilizan el tiempo de transito, la distancia desde el pasa al limite del área se calcula mediante la formula de la velocidad real del agua subterránea  $V_a = VI$  m (ver 1.4.2) y el valor límite adoptado del tiempo de tránsito, por ej. 50 días. Para cada sitio los parámetros necesarios incluyen la porosidad eficaz, el gradiente hidráulico, la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero. Los cálculos pueden llevarse a cabo con la ayuda de una computadora.



**Figura 24.** Determinación de un área de protección por el método analítico de flujo uniforme

**Ventajas.** El método utiliza ecuaciones que generalmente son fáciles de entender y de resolver por la mayoría de los hidrogeólogos e ingenieros civiles y, al tomar en consideración características propias de cada lugar, refleja mejor sus condiciones que los

métodos anteriores. Es además el método más ampliamente usado y aquel especialmente indicado para valorar la depresión en el área más cercana al pozo.

**Desventajas.** Emplea modelos conceptuales que generalmente no tienen en cuenta, al menos en parte, límites hidrológicos (por ejemplo ríos, canales, lagos, etcétera), heterogeneidades del acuífero y una recarga no uniforme.

Los costos son relativamente bajos, salvo que los datos hidrogeológicos de un lugar no puedan ser deducidos de informes hidrogeológicos locales o regionales y deban ser producidos mediante una exploración específica, como generalmente es el caso.

### **5.3.5. Relevamiento Hidrogeológico**

En muchos ambientes hidrogeológicos los criterios de límites de flujo y de tiempo de tránsito pueden ser mapeados por métodos geológicos, geofísicos y de trazadores. Los límites de flujo son definidos por variaciones litológicas o contrastes en la permeabilidad del acuífero. Las observaciones geológicas de superficie indican cambios litológicos que pueden ser correlacionados con límites del área de protección. La prospección geofísica de superficie puede ser usada para mapear la extensión y el espesor de acuíferos libres.

El relevamiento hidrogeológico también incluye la medición de los niveles de agua subterránea para identificar las direcciones de flujo y las divisorias de agua subterránea.

La delimitación de las áreas de recarga de acuíferos kársticos y/o fisurados puede iniciarse por un análisis topográfico de las divisorias de agua, complementado por un mapa de la superficie freática usando los niveles de agua en perforaciones y manantiales. Un refinamiento posterior de las vías de recarga puede efectuarse usando trazadores.

Para la delimitación de áreas de protección el relevamiento hidrogeológico es aplicable a ambientes hidrogeológicos dominados por límites de flujo en superficie o a poca profundidad, tal como se encuentran en muchos acuíferos aluviales de extensión reducida y con altas velocidades flujo, y a acuíferos altamente anisótropos tales como kársticos y fracturados. El método requiere una experiencia muy especializada en cartografía geológica y geomorfológica, combinada con un buen criterio hidrogeológico para reconocer los probables límites de flujo. Es poco o nada aplicable en acuíferos regionales extensos y/o profundos.

### **5.3.6. Modelos Matemáticos**

Áreas de protección pueden ser diseñadas usando modelos para computadora que simulan el flujo del agua subterránea y/o el transporte de solutos por métodos numéricos. Una amplia variedad de modelos de computación está actualmente disponible, tanto comercialmente como a través de organizaciones públicas y privadas. El empleo de modelos es particularmente útil para delimitar áreas de protección donde los límites y las condiciones hidrogeológicas son complejas. La información necesaria incluye parámetros hidráulicos, espesor saturado, recarga, geometría del acuífero y ubicación de los límites hidrológicos, y, según el caso, también la dispersividad.

Criterios tales como depresión, límites de flujo y tiempo de tránsito pueden ser mapeados usando modelos matemáticos, generalmente en un procedimiento que comprende dos

pasos. Primero, con un modelo matemático de flujo se genera la distribución de niveles piezométricos bajo ciertas condiciones y parámetros hidráulicos y con límites de flujo seleccionados de manera tal que determinen la extensión del área modelada. Luego, con un modelo numérico de transporte que usa la piezometría anteriormente calculada, se calculan los límites del área de protección sobre la base del criterio seleccionado. Este último cálculo puede incluir fenómenos tales como dispersión y adsorción, o simplemente efectuarse determinando el tiempo de tránsito hidráulico.

Este método tiene un alto grado potencial de precisión y puede ser aplicado a casi todas las condiciones hidrogeológicas. Los modelos también pueden usarse para predecir el comportamiento dinámico del área de protección, por ejemplo variaciones en su extensión como resultado de causas naturales y/o antropogénicas. Una de sus desventajas es la de requerir considerable experiencia en hidrogeología y modelación. También pueden ser menos precisos que métodos analíticos en determinar las depresiones alrededor de los pozos bombeados, debido a las limitaciones de los modelos en el espaciado y la densidad de la malla.

Los costos para desarrollar y correr un modelo numérico para definir áreas de protección suelen ser relativamente altos, dependiendo de la disponibilidad y calidad de los datos (generalmente insuficientes), del número de pozos y de la complejidad hidrogeológica. Un modelo puede resultar más económico si las condiciones hidrogeológicas son relativamente homogéneas y/o la información existente es abundante, y las condiciones hidrogeológicas del área son conocidas. Un costo alto puede estar justificado en situaciones donde se necesita un alto grado de precisión.

## 5.4. EJEMPLOS INTERNACIONALES

Hay muchos ejemplos de programas para el establecimiento de áreas de protección en los Estados Unidos y en Europa. La estructura y el alcance de estos programas varían reflejando distintas condiciones demográficas, políticas e hidrogeológicas. La finalidad principal de los mismos es la delimitación de áreas de protección imponiendo usos controlados de la tierra para proteger pozos de abastecimiento público. Los métodos varían en sofisticación desde aquellos que pueden ser aplicados por profesionales no técnicos (por ejemplo el de radio fijo arbitrario) a aquellos muy complejos que requieren profesionales altamente especializados (por ejemplo modelos matemáticos). A continuación se describen brevemente los procedimientos usados en algunos Estados a fin de dar una idea de lo que se está haciendo en Estados Unidos y Europa (USEPA, 1987).

### 5.4.1. Estados Unidos

Las “Enmiendas a la Ley de Agua Potable Sana” de 1986 pusieron en marcha un programa federal para proteger los recursos de agua subterránea usados para abastecimiento público contra una amplia gama de amenazas potenciales. La ley procura alcanzar este objetivo mediante el establecimiento de “Programas de Áreas de Protección de Pozos” por parte de cada uno de los estados federados, a fin de “proteger las áreas de pozos de contaminantes que puedan tener un efecto adverso en la salud de las personas”.

**Florida.** Varias municipalidades de Florida tienen programas sofisticados para la protección del agua subterránea y el Estado ha establecido un programa de áreas de protección de pozos para acuíferos vulnerables. Este programa requiere en las áreas de protección una restricción de actividades que pudieran contaminar el agua subterránea. La ley propuesta establece dos zonas de protección alrededor de pozos de abastecimiento público con una extracción de por lo menos 379 m<sup>3</sup> diarios. Estas zonas son definidas como dos áreas concéntricas de 60 metros de radio y de 5 años de tiempo de tránsito, respectivamente. La zona de 5 años de tiempo de tránsito es definida mediante una ecuación analítica volumétrica. Dentro de estas zonas concéntricas los desagües pluviales, los tanques subterráneos, tuberías subterráneas de conducción y otras fuentes de contaminación están sujetas a diferentes grados de control, dependiendo de su proximidad a los pozos. Por ejemplo dentro de la zona de 60 metros están prohibidas todas las instalaciones y descargas nuevas. Dentro de la zona de 5 años, los desagües nuevos de diferentes tipos están sujetos a control y monitoreo, descargas nuevas de efluentes industriales con compuestos riesgosos están prohibidas y nuevas descargas de efluentes domésticos tratados se permiten bajo una serie de condiciones.

**Massachusetts.** El estado no exige extensas áreas de protección (excepto para riesgos microbianos), pero lleva a cabo un programa para asistir a los gobiernos locales en la protección de sus pozos de abastecimiento público. Como parte de este programa se han definido 3 zonas de contribución que abarcan la totalidad del área de recarga de un pozo público, considerando que en esta área geográfica el uso de la tierra puede afectar la calidad del agua de abastecimiento.

La zona 1 tiene un radio de 120 metros alrededor del pozo y debe cumplir con las regulaciones del estado sobre la calidad del agua.

La zona 2 es el área de un acuífero que aporta agua a un pozo bajo las condiciones más severas de recarga y bombeo que en forma realista puedan ser anticipadas. Está limitado por las divisorias de agua subterránea producidas por el bombeo y por el contacto del acuífero con materiales menos permeables, tales como till y basamento, y en algunos lugares con límites de recarga como ríos y lagos.

La zona 3 es el área situada más allá de la zona 2, desde la cual el agua superficial y subterránea escurren a la zona 2. La cuenca de drenaje superficial determinada por topografía comúnmente coincide con la cuenca de agua subterránea y es la utilizada para delimitar esta zona 3; donde estas dos cuencas no coinciden, ambas integran la zona 3 de protección.

#### 5.4.2. Europa

Por lo menos 11 países europeos han desarrollado programas de protección del agua subterránea comparables al concepto del área de protección. En su "Directiva sobre la Protección del Agua Subterránea contra la Polución Causada por Ciertas Sustancias Peligrosas" de 1979, la Comunidad Europea requiere de sus estados miembros la protección (por ley, regulación y medidas administrativas) de toda el agua subterránea utilizable contra la descarga directa e indirecta de una lista de sustancias. Sin embargo, en Europa los programas de protección del agua subterránea son muy anteriores a esta directiva. El desarrollo de políticas para prevenir el ingreso de contaminantes al subsuelo comenzó en el siglo pasado, aunque las leyes y regulaciones más importantes datan de

los años 50. Alemania y Holanda tienen la experiencia más amplia en este sector y el programa del primero de estos países será brevemente descrito más adelante.

Los programas europeos generalmente involucran la delimitación de por lo menos tres zonas de protección, definidas por distancia y/o tiempo de tránsito. Son éstas anillos más o menos concéntricos, comenzando con el área inmediatamente alrededor del pozo. La zona exterior comúnmente se extiende hasta el límite del área de recarga. Dentro de estas zonas se imponen restricciones a un número de actividades, tales como basurales, almacenamiento y transporte de sustancias químicas riesgosas, disposición de efluentes y la aplicación de pesticidas lixiviables. El nivel de restricción decrece a medida que aumenta la distancia a los pozos.

En **Alemania**, el establecimiento de áreas de protección se basa principalmente en soluciones analíticas. La Zona 1 abarca las inmediaciones del pozo hasta un radio de 10 a 100 metros. La Zona 2, limitada por un tiempo de tránsito de 50 días, está diseñada para proteger contra una contaminación por microbios (DVGW, 1995). La Zona 3 es subdividida en una interior y otra exterior; la Zona 3A se extiende hasta 2 kilómetros del pozo (si el límite del acuífero está más lejos) y la Zona 3B hasta el límite del área de aporte. La distancia de 2 kilómetros de la Zona 3A se basa en la experiencia de la industria de que nunca se han encontrado efectos de polución originados a una distancia mayor. Como muchos acuíferos están alojados en cuencas sedimentarias de poca extensión, también se utilizan los métodos de relevamiento hidrogeológico y simulación numérica, en un enfoque cuenca a cuenca.

## 6. IMPACTO AMBIENTAL

Se entiende por impacto ambiental a la alteración que la ejecución de un proyecto introduce en el medio ambiente, expresada por la diferencia entre la evolución de uno o más parámetros de calidad ambiental sin y con proyecto.

Los proyectos, por ejemplo los de explotación de recursos hídricos subterráneos, pueden generar entonces alteraciones que involucran procesos consecutivos:

- Modificación de las características del medio (por ejemplo de los acuíferos).
- Modificación de su capacidad de conservar la calidad del bien explotado (por ejemplo del agua subterránea).
- Repercusión de estas modificaciones sobre la salud y el bienestar humano.

Estos impactos pueden tipificarse en función de su naturaleza, signo, localización, tamaño, reversibilidad, permanencia, etcétera, pero la difusión y aceptación de metodologías para estudiar sus reales características se debe a que muchos de ellos son predominantemente negativos e involucran de manera directa a un número cada vez mayor de individuos o adquieren características globales.

El tema se trata extensionalmente en el Capítulo XVI de esta Fundamentación, aquí se exponen solamente los aspectos principales vinculados a una explotación del agua subterránea para abastecimiento público.

Para utilizar apropiadamente los recursos de agua subterránea debe prestarse atención no solamente a la investigación de sus características, sino también a los correctos métodos de construcción, ubicación, protección y explotación de las captaciones. Desatender tales detalles conduce a la inadecuada explotación del recurso y por ende al deterioro del mismo, sea para la utilización propia y/o la de terceros.

Resulta entonces de importancia considerar qué modificaciones se generan a partir de la instalación de los pozos afectando las características del entorno, como ser:

- Alteración de las condiciones hidráulicas en el (los) acuífero(s).
- Alteración de las condiciones químicas en el (los) acuífero(s).
- Limitación del uso de la tierra.
- Variaciones de la reserva de agua subterránea.

### 6.1. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS

La explotación del recurso mediante la instalación de captaciones genera en las inmediaciones descensos del nivel piezométrico que pueden afectar captaciones privadas, sean éstas para consumo humano, industrial o agropecuario, cuando se produce la interferencia entre las áreas de influencia de los pozos de abastecimiento y los particulares. La mayor depresión resultante, que en cada pozo trae acarreado un gasto

energético adicional para mantener el mismo caudal de extracción, puede calcularse mediante las ecuaciones de flujo del agua subterránea.

Si los descensos son importantes se modifican también los parámetros hidráulicos del medio:

- En un acuífero libre, una reducción del espesor saturado y por lo tanto de la transmisividad.
- Un acuífero confinado puede volverse libre, reemplazándose su coeficiente de almacenamiento por la porosidad eficaz.

## **6.2. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES QUÍMICAS**

Las variaciones hidráulicas pueden al mismo tiempo causar variaciones en la calidad del recurso mediante varios mecanismos:

- Infiltración vertical a través de acuitardos desde otros acuíferos (especialmente el freático) que contengan aguas de diferente calidad, alterando la química en captaciones propias y de particulares linderos al proyecto.
- Infiltración inducida o acelerada de aguas superficiales de ríos, lagunas y arroyos contaminados.
- Invasión salina por movilización de la interfaz agua dulce – salada, sea en acuíferos costeros o en lentes de agua dulce.

## **6.3. LIMITACIÓN DEL USO DE LA TIERRA**

Si para la conservación del recurso se establece un área de protección alrededor de los pozos de abastecimiento, ello suele significar importantes intervenciones en el ordenamiento territorial. La implementación de áreas de protección generalmente se efectúa regulando, en función de distintos radios de influencia, las actividades que se realicen en las mismas, no dando lugar a las que produzcan interferencias con la extracción del agua ni sean posibles fuentes de contaminación del recurso a captar.

## **6.4. VARIACIONES DE LAS RESERVAS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

Cuando el caudal captado es menor que la recarga de un acuífero, se acaba alcanzando un nuevo equilibrio en el sistema de agua subterránea; cuando la extracción supera a la recarga se produce un progresivo vaciado del acuífero por el consumo de sus reservas. Este proceso, llamado sobreexplotación o minería del agua, no es fácil de reconocer si no es a través de estudios de detalle y una buena red de monitoreo piezométrica mantenida en el tiempo. Su consecuencia es un continuo descenso de niveles de agua causando un permanente incremento de costos de extracción y tal vez la necesidad de nuevas perforaciones de explotación, como así también, según las condiciones del lugar, las alteraciones hidráulicas y químicas antes mencionadas.

## 7. PROGRAMAS PARA COMPUTADORA

En el comercio existen numerosos programas para computadora que pueden ser utilizados para facilitar y mejorar el procesamiento y la interpretación de datos en los estudios hidrológicos para la investigación y explotación de agua subterránea. Entre ellos pueden mencionarse los siguientes:

*AQTESOLV*, de Geraghty & Miller, Inc., Reston, Virginia, USA: para la interpretación de ensayos de acuífero, ensayos de pozo y ensayos de permeabilidad en acuíferos libres, confinados, semiconfinados y fracturados.

*GRAPHER*, de Golden Software, Inc., Golden, Colorado, USA: para la creación de gráficos de todo tipo, por ejemplo lineales, logarítmicos, semilogarítmicos, triangulares, etcétera.

*LogPlot98*, de RockWare, Golden, Colorado, USA: para confeccionar perfiles de pozos, incluyendo litología, composición granulométrica, perfilaje geofísico, gráfico de avance, esquema de entubado y otros.-

*RockWorks98*, de RockWare, Golden, Colorado, USA: para el procesamiento, análisis y representación gráfica de datos geológicos en forma de mapas de ubicación, mapas de isolíneas, blockdiagramas, cortes transversales, mapas de superficies tridimensionales, histogramas, gráficos de dispersión, diagramas azimutales, diagramas triangulares, perfiles litológicos, etcétera.

*SURFER*, de Golden Software, Inc., Golden, Colorado, USA: para la confección de mapas de isolíneas, mapas de superficies tridimensionales y cortes transversales, incluyendo el tratamiento estadístico de datos como ser regresión, kriging, curvatura mínima y otros.

*Visual MODFLOW*, de Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Ontario, Canadá: modelo matemático para la simulación en 3 dimensiones del flujo de agua subterránea y del transporte de solutos en acuíferos simples o múltiples.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Boulton, N.S.; 1954, 1956, 1963. *en* Cherry, J.A. y Freeze, R.A., 1979.
- Bouwer, H., 1978. Groundwater Hydrology. MacGraw-Hill Book Company, New York.
- Cherry, J.A. y Freeze, R.A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- CoFAPyS, 1993. Revisión y Actualización de las Normas de Estudio, Diseño y Presentación de Proyectos de Desagües Cloacales. Buenos Aires.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (ed.), 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona.
- Domenico, P. and Schwartz, F., 1998. Physical and Chemical Hydrogeology, 2<sup>nd</sup>. edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Driscoll, F.G., 1986. Groundwater and Wells. Second Edition (6<sup>th</sup> printing, 1995). U.S.Filter/Johnson Screens, St. Paul, Minnesota.
- DVGW, 1995. Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; I. Teil: Schutzgebiete für Grundwasser. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn.
- Feth, J.H., 1973. *en* Bouwer, H., 1978.
- Hantush, M.S., 1955, 1956, 1960. *en* Cherry, J.A. y Freeze, R.A., 1979.
- Helweg, O.J. 1982. Economics of improving well and pump efficiency. Ground Water, vol. 20, Nr. 5, National Groundwater Association, Westerville, Ohio.
- Jacob, C.E., 1950, 1955, *en* Cherry, J.A. y Freeze, R.A., 1979.
- Johnson Inc., Edward E., 1975. El Agua Subterránea y los Pozos. Johnson Division UOP, Inc., St. Paul, Minnesota, USA.
- Kruseman, G.P. y De Ridder, N.A., 1975. Analisis Y Evaluación de Ensayos por Bombeo. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Holanda.
- Kruseman, G.P. y De Ridder, N.A., 1994. Analysis And Evaluation of Pumping Test Data, 3<sup>rd</sup> edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Holanda.
- Mercer, J.W. y Faust, Ch.R., 1981. Ground-Water Modeling. National Groundwater Association, Westerville, Ohio.
- Nace, R.L. 1960. *en*. Bouwer, H., 1978.
- Neuman, S.P. y Witherspoon, P.A., 1969a, 1969b, 1972. *en* Cherry, J.A. y Freeze, R.A., 1979.
- Neuman, S.P., 1972, 1975. *en* Cherry, J.A. y Freeze, R.A., 1979.

- USEPA, 1987. Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
- Walton, W.C., 1970. Groundwater Resource Evaluation. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Walton, W.C., 1996. Aquifer Test Analysis with Windows (con diskette). CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Wang, H. and Anderson, M., 1995. Introduction to Ground Water Modeling. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA.
- Ward, S.H. (ed.), 1990. Geotechnical and Environmental Geophysics. Series Investigation in Geophysics, vol.5, (3<sup>rd</sup> Printing, 1994). Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA.

## 9. ANEXO: EJEMPLOS DE DISEÑO Y PLANOS TÍPICOS

### 9.1. RELLENO DE GRAVA Y FILTRO

#### 9.1.1. Cálculo de un Relleno de Grava y Filtro

Se desea determinar el tamaño de grano del prefiltro de grava y la abertura del filtro para un acuífero de arena fina, cuyo horizonte más fino tiene la siguiente composición granulométrica hallada mediante tamizado:

Tamaño (mm)	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado
< 0.063	2	100
0.063	8	98
0.125	74	90
0.250	16	16
0.500	0	0

**Tabla 2.** Análisis granulométrico

De acuerdo con la correspondiente curva acumulativa de la **Figura 25**, el tamaño de grano correspondiente al 70 % retenido es:  $d_{70} = 0.15$  mm. Como el material es bien seleccionado, el factor de multiplicación adecuado es 4 y el tamaño de grano correspondiente al 70 % retenido de la grava es:

$$D_{70} = 0.15 \text{ mm} \times 4 = 0.6 \text{ mm}$$

De la curva trazada por este punto del gráfico (Figura 1) resulta una grava de la siguiente composición:

0.5 – 0.6 mm: 30 %

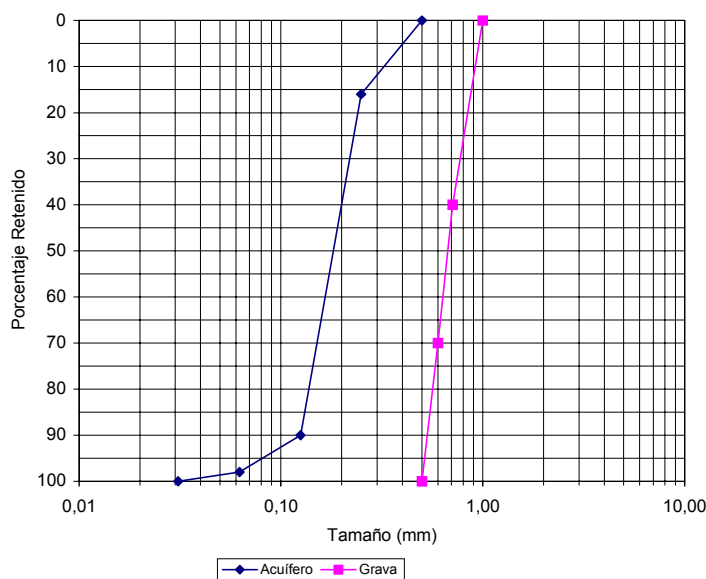
0.6 – 0.7 mm: 30 %

0.7 – 1.0 mm: 40 %

A fin de verificar si esa grava cumple con la condición de poseer un Coeficiente de Uniformidad menor o igual a 2.5, de su curva acumulativa (**Figura 25**) se leen los tamaños de grano correspondientes al 40 % y 90 % retenido y se calcula:

$$u = D_{40} / D_{90} = 0.71 \text{ mm} / 0.55 \text{ mm} = 1.3$$

Finalmente, para retener como mínimo el 90 % de la grava, la abertura de filtro correspondiente disponible en el mercado es de 0.5 mm.



**Figura 25.** Curva de tamizado de la arena del acuífero y del prefiltro de grava

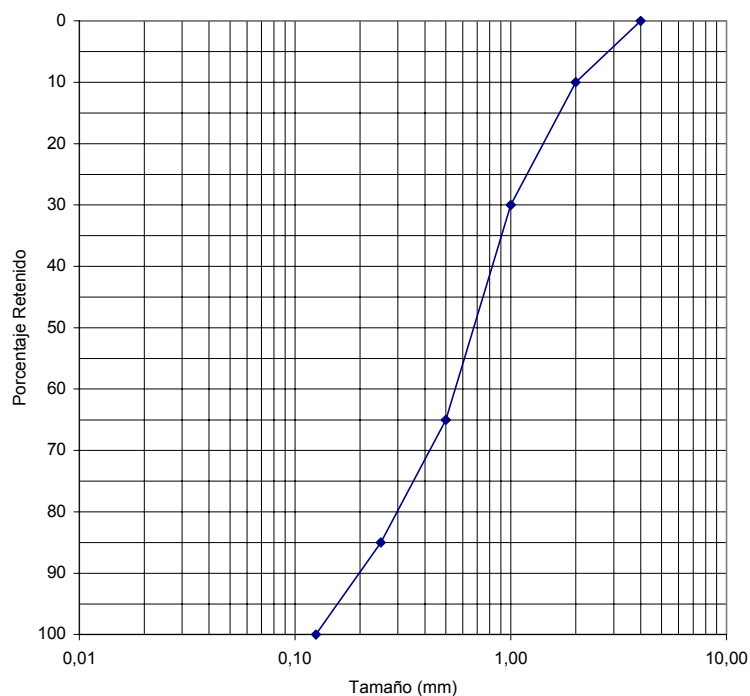
### 9.1.2. Determinación de la Abertura de un Filtro sin Relleno de Grava

Calcular la abertura de filtro para un acuífero de arena gruesa heterogénea cuyo análisis granulométrico arrojó los siguientes resultados:

Tamaño (mm)	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado
0.125	15	100
0.250	20	85
0.500	35	65
1.0	20	30
2.0	10	10
4.0	0	0

**Tabla 3.** Análisis granulométrico

En la curva acumulativa de la **Figura 26**, construida con los datos anteriores, se observa que un filtro con una abertura de 0.8 mm retendría el 40 % del material del acuífero y con una de 0.65 mm el 50 %. Se selecciona entonces una abertura de 0.75 mm, disponible en el mercado.



**Figura 26.** Curva acumulativa de un acuífero de arena gruesa

## 9.2. ENTUBADOS

### 9.2.1. Entubado Telescópico de un Acuífero Semiconfinado

En la exploración hidrogeológica se han encontrado los siguientes acuíferos con agua dulce:

- Un acuífero freático, de arena mediana con intercalaciones de arena gruesa, entre los 3.25 m y 22 m de profundidad.
- Un acuífero semiconfinado entre los 26 m y 56 m de profundidad, cuya sección superior, hasta los 38 m, está formada por arena fina limosa con intercalaciones de limo y su inferior por arena fina a mediana.

Por el riesgo de contaminación que presenta el acuífero freático, se desea explotar el acuífero semiconfinado mediante la perforación mostrada en la **Figura 27**. Es decir, con filtro de ranura continua en la sección inferior de granulometría más gruesa y uniforme y un entubado telescópico para lograr una mejor aislación del acuífero freático y un menor costo de cañería y filtro.

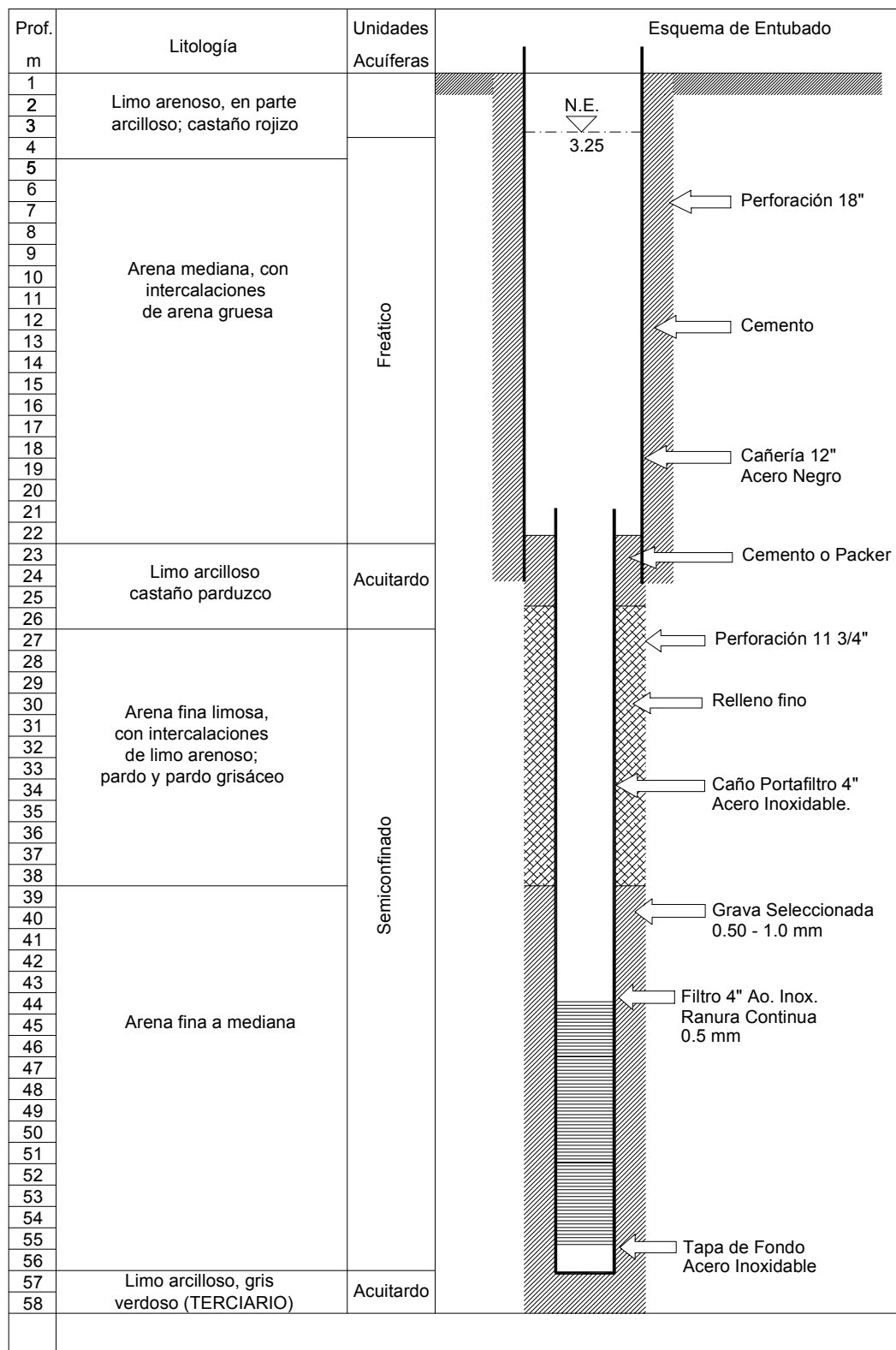
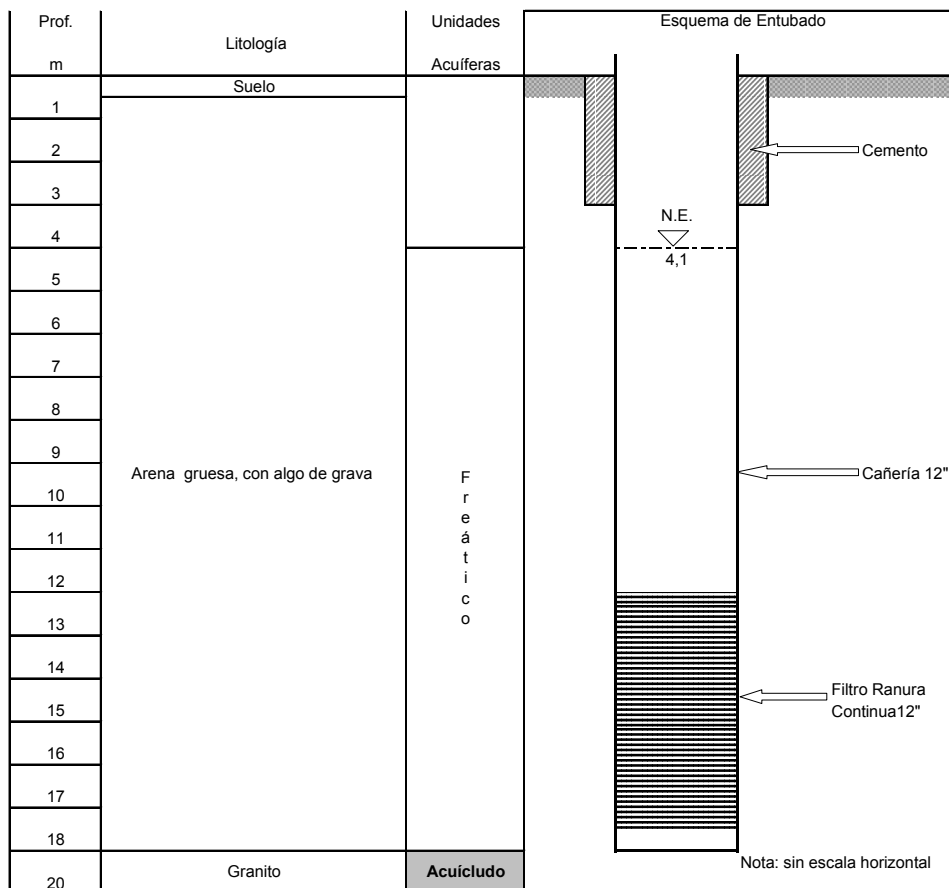


Figura 27. Entubado telescópico de un acuífero semiconfinado

### 9.2.2. Entubado Continuo de un Acuífero Freático

Para la explotación de un acuífero freático de aproximadamente 14 m de espesor, formado por arena gruesa, se estima que la extracción prevista cause una depresión de aproximadamente 6 m. Se diseña en consecuencia un pozo de bombeo con filtro natural (sin engravado) en su parte inferior entre los 12 m y 17.5 m de profundidad (**Figura 28**), cuya longitud de 5.5 m equivale aproximadamente a un 40 % del espesor acuífero.



**Figura 28.** Entubado continuo de un acuífero freático

### 9.3. PROGRAMA DE TRABAJO PARA UNA PERFORACIÓN TELESCÓPICA

Para la construcción de la perforación del ejemplo 9.2.1 y de la **Figura 27**, se requiere de la empresa de perforación el cumplimiento del siguiente programa de tareas:

- 1). Perforar, o perforar y ensanchar, en 18 " hasta los 24 metros.
- 2). Entubar como sigue:

Caño liso 12": + 0,50 m - 24,00 m

La cañería será de acero negro, sin costura, con un espesor de pared mínimo de 4,78 mm y extremos biselados y frenteados para soldar; llevará centralizadores de tres elementos cada 12 metros aproximadamente.

3). Sellado:

Rellenar el espacio anular entre 0 y 24 metros con cemento con 10% de bentonita, hincar la cañería de 12" (si no se hizo antes) y dejar fraguar el cemento.

4). Perforar ,o perforar y ensanchar ,hasta los 58 metros en 11 3/4" usando agua limpia o con agregado de un polímero biodegradable.

5). Entubar como sigue:

Caño liso 4"	21,00 m - 43,00 m
Caño filtro 4", ranura 0.5 mm	43,00 m - 55,00 m
Caño ciego 4"	55,00 m - 56,00 m

Centralizadores de acero inoxidable, de 3 elementos c/u, o sea a 120 grados uno del otro, a las siguientes profundidades: 24 - 36 - 57 metros.

La cañería lisa del portafiltro y caño ciego y los caños filtro serán de acero inoxidable con extremos para soldar, siendo los últimos de ranura continua de 0.5 mm de abertura.

6). Cambio de inyección, con una limpieza previa del circuito, y lavado de la perforación con inyección liviana.

7). Engravar desde 38 m a 58 m con grava seleccionada de la siguiente composición:

- 60% de 0.50 – 0.71 mm
- 40% de 0.71 – 1.0 mm

La grava debe ser limpia, redondeada, libre de mica, calcáreos y materiales extraños (tierra, pasto, etc.).

Durante su instalación, controlar regularmente el nivel de grava y comparar con el volumen colocado.

8). Cementado y Terminación del Pozo.

Rellenar el espacio anular encima del engravado con material fino hasta una profundidad de 25 metros y luego sellar con un packer o cemento con 10% de bentonita entre 22 y 25 m.

En la superficie se construirá una plataforma de cemento, en unión con el cementado del espacio anular, de aproximadamente 1 metro cuadrado y con un espesor de 15 cm en el centro y de 10 cm en el borde, tal que su cara superior tenga pendiente hacia la periferia.

En la boca del caño camisa se colocará una sólida tapa de acero, removible, que cierre herméticamente sobre el caño camisa, el caño de la bomba y el tubo piezométrico. El orificio para este último llevará una sólida tapa de acero a rosca.

**9). Limpieza y Desarrollo.**

Se llevará a cabo mediante lavado con chorros de agua de alta presión y bombeo con compresor y/o con bomba de desarrollo. Los bombeos serán intermitentes y con caudales crecientes hasta el máximo posible del pozo (mínimo 90 m<sup>3</sup>/h); se efectuarán mediciones sucesivas del caudal y del nivel dinámico. Se dará por terminado cuando, a criterio de la INSPECCION, se haya logrado un caudal específico estable y satisfactorio y agua libre de sedimentos. Al final del bombeo se efectuará la limpieza del fondo de la perforación mediante compresor o bomba, pero no cuchara a dardo o plana ("clappé"), hasta que quede libre de sedimentos.

**10). Ensayo de Bombeo.**

Este comprenderá:

- Mediciones de control del nivel estático durante 24 horas anteriores al bombeo.
- Ensayo a caudal variable en cuatro escalones de igual magnitud y de 1,5 horas c/u, hasta un caudal máximo a ser determinado en base a los resultados del desarrollo, pero no menor de 90 m<sup>3</sup>/h (para el ejemplo).
- Recuperación del nivel *estático* (por lo menos durante 10 -12 horas), con mediciones de control.
- Ensayo a caudal constante de 24 horas de duración, con un caudal determinado en base al ensayo escalonado y en principio igual al de explotación previsto (60 m<sup>3</sup>/h).
- Ensayo de recuperación de igual duración o hasta alcanzar la estabilización del nivel de agua si esto ocurriera antes.

Para las mediciones del nivel de agua se instalará un tubo piezométrico de 1" hasta aproximadamente la profundidad de la bomba.

Durante el ensayo se tomarán muestras de agua al principio, medio y final del bombeo, que serán analizadas en laboratorio de acuerdo a lo indicado por el COMITENTE.

**11). Desinfección.**

Una vez instalada la bomba definitiva de producción, se llevará a cabo la desinfección de la perforación de acuerdo a las normas vigentes en el lugar o las que el COMITENTE indique. En caso de que entre el ensayo de bombeo y la instalación de la bomba pasen varios días, inmediatamente después del ensayo se realizará una desinfección intermedia según las mismas normas y se dejará la perforación herméticamente cerrada con una tapa inviolable.

**12). Informes Técnicos.**

El CONTRATISTA entregará a la INSPECCION y/o al COMITENTE los siguientes informes sobre los trabajos realizados:

- Ensayo de Bombeo

Al terminar c/u de las etapas a) a e) del ensayo, una copia (bien legible) de los registros de campo de todas las mediciones de caudal, nivel de agua, conductividad eléctrica, etc. efectuadas.

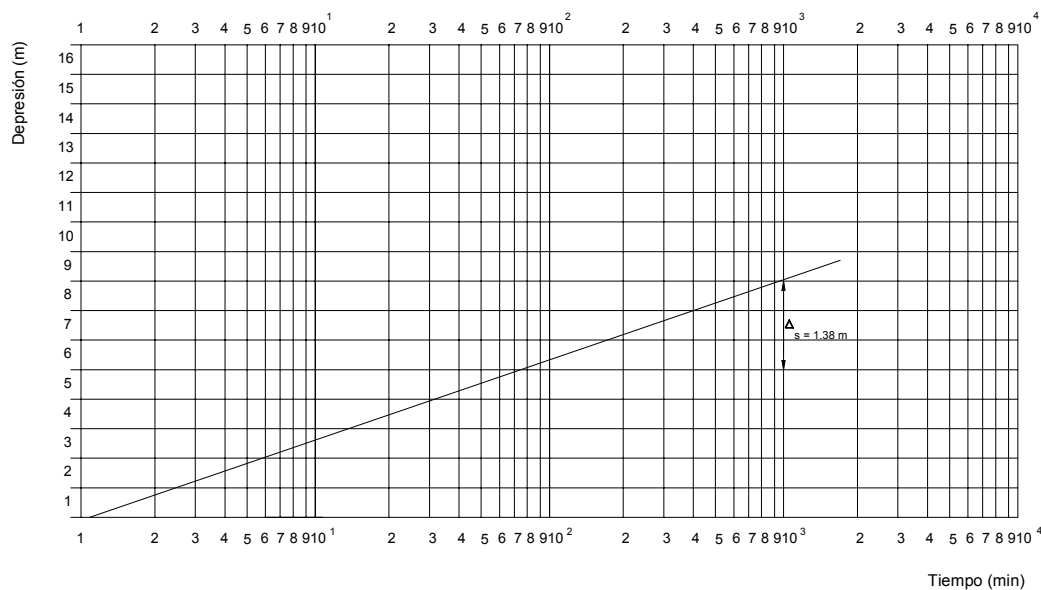
- Informe Final

Dentro de un plazo no mayor de 3 semanas después de haber completado los trabajos de campo, conteniendo como mínimo lo siguiente:

- Mapa de ubicación
- Perfil técnico con todos los detalles constructivos y de materiales instalados.
- Perfil geológico y análisis granulométricos.
- Cronograma y descripción de las tareas realizadas, incluyendo un detalle de las de limpieza y desarrollo y de desinfección.
- Datos del ensayo de bombeo en forma de un listado en limpio de todas las mediciones efectuadas y memoria descriptiva del mismo.

## 9.4. INTERPRETACIÓN DE UN ENSAYO DE ACUÍFERO

Para hallar los parámetros hidráulicos de un acuífero se realizó un ensayo de acuífero de 24 horas de duración con un caudal constante  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $2400 \text{ m}^3/\text{día}$ ), efectuándose mediciones del nivel de agua en un pozo de observación situado a una distancia de 36 m del de bombeo. Como en principio se cumplen las condiciones necesarias de tiempos grandes y distancia pequeñas, la interpretación puede hacerse por el método de Jacob.



**Figura 29.** Gráfico depresión – tiempo

Para ello se confeccionó, con los datos del pozo de observación mencionado, el gráfico de la **Figura 29**, representando en papel semilogarítmico los valores de  $s$  en función del tiempo, con los valores del tiempo en la escala logarítmica, y trazando a continuación una recta ajustada al tramo rectilínea de la curva. La extensión de esa recta corta al eje de los tiempos en  $t_0 = 1,05$  minutos (0,00072 día), y su pendiente, dada por la diferencia de descensos por ciclo logarítmico de tiempo, es  $\Delta s = 1,38$  m.

Para calcular la *transmisividad*  $T$  se sustituye los valores de  $Q$  y  $\Delta s$  en la fórmula de Jacob

$$T = 2.3 \cdot Q / (4 \cdot \pi \cdot \Delta s)$$

y se obtiene

$$T = 2.3 \cdot 2400 / (4 \cdot 3.14 \cdot 1.38) = 320 \text{ m}^2/\text{día}$$

Conocido ahora los valores de  $T$  y de  $t_0$ , se calcula el *coeficiente de almacenamiento*

$$S = 2.25 \cdot T \cdot t_0 / r^2 = 2.25 \cdot 320 \cdot 0.00072 / 36^2 = 0,0004$$

Finalmente, para verificar si se cumple la condición de  $u < 0.01$  para poder utilizar el método de Jacob, a partir de la ecuación

$$u = r^2 \cdot S / (4 \cdot T \cdot t)$$

se calcula el tiempo a partir del cual se cumple la condición mencionada

$$t = 36^2 \cdot 0.0004 / (4 \cdot 320 \cdot 0.01) = 0.04 \text{ día} = 58 \text{ min.}$$

pudiendo comprobarse en la **Figura 29** que los valores utilizados para trazar la recta efectivamente se extienden más allá de los 58 minutos, cumpliendo así con lo requerido.

## 9.5. CALCULO DE LA EFICIENCIA DE UN POZO

Para el pozo de bombeo del ejemplo anterior se desea calcular la eficiencia del pozo a fin de verificar si la misma cumple con los términos del contrato de ser igual o superior al 70 %.

El pozo tiene un entubado de 152 mm (6") de diámetro y durante el ensayo se observó en el mismo una depresión  $s_p = 15,67$  m al cabo de 12 horas (0,5 días) de bombeo.

El *caudal específico real*  $Q_{ep}$  del pozo es

$$Q_{ep} = Q / s_p = 100 / 15,67 = 6,4 \text{ m}^2/\text{h}$$

Para hallar el *caudal específico teórico*, es decir el máximo posible originado solamente por la depresión propia del acuífero sin ninguna pérdida de carga adicional, la depresión teórica  $s_t$  en el pozo de bombeo puede calcularse con la fórmula de Jacob, para una distancia  $r$  igual al radio del pozo:

$$s_t = [2.3 \cdot Q / (4 \cdot \pi \cdot T)] \cdot \log [2.25 \cdot T \cdot t / (r^2 \cdot S)]$$

Con los valores arriba indicados y los parámetros hidráulicos del ejemplo anterior

$$s_t = [2.3 \cdot 2400 / (4 \cdot 3.14 \cdot 320)] \cdot \log [2.25 \cdot 320 \cdot 0.5 / (0.076^2 \cdot 0.0004)] = 11.23 \text{ m}$$

El *caudal específico teórico* es entonces

$$Q_{et} = Q / s_t = 100 / 11.23 = 8.9 \text{ m}^2/\text{h}$$

y la *eficiencia* del pozo en porcentaje

$$ef = Q_{ep} \cdot 100 / Q_{et} = 72\%$$

Prof. m	Litología	Unidades Acuíferas	Esquema de Entubado
1	Limo arenoso, en parte arcilloso; castaño rojizo		
2			
3			
4			
5	Arena mediana, con intercalaciones de arena gruesa	Freático	
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15	Limo arcilloso castaño parduzco	Acuitando	
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25	Arena fina limosa, con intercalaciones de limo arenoso; pardo y pardo grisáceo	Semiconfinado	
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35	Limo arcilloso, gris verdoso (TERCIARIO)	Acuitando	
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45	Avena fina a mediana		
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55	Limo arcilloso, gris verdoso (TERCIARIO)	Acuitando	
56			
57			
58	Limo arcilloso, gris verdoso (TERCIARIO)	Acuitando	
59			

Análisis químicos			
Muestra N°	1	2	3
Análisis N°			
Fecha			
Hora (bombeo)			
Profundidad			
Color			
Olor			
Aspecto			
Sedimento			
pH			
Cond. Electr. (micro S/cm)			
Alcalin. total			
Amonio			
Arsénico			
Bicarbonato			
Calcio			
Cloruro			
Dureza total (CO3Ca)			
Fluoruro			
Fosfato			
Hierro			
Magnesio			
Manganeso			
Nitrato			
Nitró			
Potasio			
Residuo seco (105° C)			
Silice			
Sodio			
Sulfato			
Variedad			
CLASIFICACION			
Análisis Bacteriológicos			
Muestra N°			
Fecha			
Hora (bombeo)			
Bacterias			
Bacterias			
CLASIFICACION			
Ensayo de Bombeo			
Caudal (m³/h)			
Duración (h)			
Nivel Estático (m)			
Nivel Dinámico (m)			
Caudal específico (m³/h)			
Muestra N°			
Ensayo de Acuífero			
Tipo			
Duración (h)			
Caudal (m³/h)			
Muestra N°			
Distancia Pozo observac.			
Transmisividad (m²/d)			
Coef. Almacenamiento			
Porosidad Eficaz			
Resistiv. Hidráulica			
Método Interpretación			

<b>Expte.</b>	
Perforación de Localidad: Provincia: Obra: Propietario:	Explotación N°: 4 Partido:
Empresa de perforación: Método: rotativo Perfilaje Geofísico: sí - no Fecha Terminación:	
Inyección: bentonita Firma del Contratista	
Vo. Bo. Inspección	
Croquis de Ubicación	
Ubicación geográfica Coordenadas gauss-Krüger: Y= X= M.s.u.m.	
Cota Boca de Pozo	

NOTAS:

