

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD DE LAS
AGUAS SUBTERRANEAS APLICADA AL ANTIGUO
BOTADERO DE DESECHOS SOLIDOS DE MARIONA,
DEPARTAMENTO DE SAN SALVADOR.**

PRESENTADO POR:

**GONZALO DE JESUS MENA LOPEZ
JUAN ORLANDO MONTES GARCIA**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2010

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR :

MSc. ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD DE LAS AGUAS
SUBTERRANEAS APLICADA AL ANTIGUO BOTADERO DE
DESECHOS SOLIDOS DE MARIONA, DEPARTAMENTO DE
SAN SALVADOR.**

Presentado por :

**GONZALO DE JESUS MENA LOPEZ
JUAN ORLANDO MONTES GARCIA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

**ING. EDGAR ALFREDO GAVIDIA PAREDES
INGRA. SUSAN ELIZABETH CAMPOS DE ORELLANA**

San Salvador, Agosto de 2010

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores:

ING. EDGAR ALFREDO GAVIDIA PAREDES

INGRA. SUSAN ELIZABETH CAMPOS DE ORELLANA

AGRADECIMIENTOS

Primeramente: A DIOS Todopoderoso por su respaldo en este proyecto ejecutado, en el cual nos permitió pasar por una serie de circunstancias en la cual aprendimos mucho.

A nuestras familias, por el apoyo y comprensión recibida de parte de ellos en todo este tiempo.

A nuestros asesores: Ing. Edgar Alfredo Gavidia Paredes e Ingra. Susan Elizabeth Campos de Orellana; por su guía, trabajo, dedicación y consejos recibidos a lo largo de la ejecución de este trabajo.

A las personas e instituciones que nos apoyaron como:

- Universidad de El Salvador.
- Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), en especial al Ing. José Buenaventura Pérez.
- Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, en especial a Licda. Sonia Ruiz de Meza.
- La Empresa de Manejo Integral de Desechos Sólidos (MIDES), en especial a Elsy de Mendoza.
- A Roxana López, secretaria de la Escuela de Ingeniería Civil, por atenderlos con amabilidad y dedicación en todo lo relacionado a los diversos trámites.

A nuestras amigas y nuestros amigos, en especial a: Esmeralda, Samantha, Elin, Víctor, y Roberto que nos apoyaron en la realización de este documento.

Y así a todas las personas no profesionales y profesionales, a las cuales se les consulto o pidió ayuda, la cual recibimos sin ningún interés.

A TOD@S MUCHAS GRACIAS

DEDICATORIA

Dedico esta obra primeramente al Creador de todo: A DIOS Todopoderoso, por su ayuda y compañía a lo largo de toda la historia de mi vida, en la cual hoy cierro una etapa muy importante.

A mi Madre: Silvia López, quien siempre me ha apoyado con su gran amor y que sus palabras y oraciones siempre me han respaldado.

A mi Padre: Francisco Mena, quien es un ejemplo de lucha, por su apoyo y por estar cerca de mí en la distancia en esta etapa de mi vida.

A mis Hermanas: Silvia y Katty, por su apoyo en todo momento.

De manera especial a Fina Rubio y a mí hermano Walter Mena, por sus palabras de ánimo y apoyo recibido en esta última etapa de mi vida.

A mi amigo y compañero de este trabajo: Juan Montes, por la buena comunicación y voluntad mostrada, que hicieron de la realización de este trabajo una buena experiencia. Y así a todas mis amigas y a todos mis amigos, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas.

Y de una manera muy especial a cada profesor(a) que he tenido a lo largo de toda mi formación académica, principalmente a Don Osmin Elías (QEPD), quien fue un gran amigo y a quien recordare siempre.

A todas estas personas y otras que formaron parte de la historia de mi vida y a todas aquellas quienes cayeron o siguen luchando por lo que creen...

GONZALO DE JESUS MENA LOPEZ

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso: Que hizo posible finalizar de manera satisfactoria el presente trabajo de graduación.

A mis Padres: Orlando Montes Flores y Blanca Lidia García de Montes, por haberme apoyado hasta hoy en día, a pesar de las dificultades enfrentadas en ocasiones en la universidad siempre logre sobreponerme a ellas con su ayuda.

A mi Hermana: Yolanda Marlene Montes García, a la que quiero mucho y sé que siempre cuento con tu ayuda

A mi Novia: Dina Lily Merino Ruiz, con tu amor y alegría siempre me alentaste a lo largo del presente trabajo siendo tu ayuda de gran importancia.

A mi compañero de tesis: Gonzalo, que a pesar de que un inicio teníamos muchas dudas respecto a este tema por los pocos conocimientos adquiridos de este en nuestra carrera logramos finalizarlo con los objetivos propuestos.

A mis grandes amigos del Club Fifa: Adán, Aldana, Caleb, Giovanni, Miguel, Roberto y Víctor, son las personas con las que paso mis ratos de ocio y los aprecio mucho a todos.

A aquellas buenas amistades de la Universidad, nunca he sido una persona de muchas amistades y ustedes hicieron mucho más fácil el camino por la carrera.

A mis amigas, Esmeralda Azahar, Paoly Aguiluz y Mónica Mata, siempre recibí buenos consejos y palabras de aliento de su parte por lo que estimo mucho su amistad.

Y a todos aquellos que en el transcurso de mi vida han ido formando la persona que soy hoy.

JUAN ORLANDO MONTES GARCIA

INDICE

INTRODUCCION	xvii
CAPITULO 1. Consideraciones Generales.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema.....	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	5
1.4. Alcances	6
1.5. Limitaciones.....	7
1.6. Justificación	7
CAPITULO 2. Generalidades	9
2.1. Acuíferos.....	9
2.1.1. Introducción	9
2.1.2. Clasificación de acuíferos	18
2.1.3. Características y propiedades generales de los acuíferos	21
2.1.4. Caracterización físico-química del agua subterránea	29
2.1.5. Contaminación de acuíferos.....	33
2.2. Vulnerabilidad de acuíferos	40
2.2.1. Definición de vulnerabilidad de acuíferos.	40
2.2.2. La vulnerabilidad en el manejo de recursos hídricos subterráneos.....	42
2.2.3. Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad.....	44
2.2.4. Técnicas y herramientas utilizadas en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas por los métodos GOD y DRASTIC	60
2.2.5. Uso de los mapas de vulnerabilidad.....	68
2.3. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	70

2.3.1.	Introducción a los SIG	70
2.3.2.	Aplicación de los SIG en el manejo de los recursos hídricos subterráneos	77
2.3.3.	Uso del ILWIS para la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos.....	78

CAPITULO 3. Aplicación de los métodos GOD y DRASTIC para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en la zona de estudio.....			84
3.1.	Información de la zona de estudio	84	
3.1.1.	Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	84	
3.1.2.	Características principales de la zona de estudio	86	
3.2.	Elaboración del mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas con la aplicación del método GOD.....	102	
3.2.1.	Presentación de información de parámetros GOD.....	102	
3.2.2.	Procesamiento de información.....	104	
3.2.3.	Presentación de mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas	122	
3.3.	Elaboración del mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas con la aplicación del método DRASTIC	124	
3.3.1.	Presentación de información de parámetros DRASTIC	124	
3.3.2.	Procesamiento de información.....	128	
3.3.3.	Presentación de mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas	145	

CAPITULO 4. Análisis de resultados y presentación de medidas de seguimiento medioambientales y técnicas de remediación de aguas subterráneas.			147
4.1.	Método GOD	147	
4.2.	Método DRASTIC	149	
4.3.	Análisis y comparación de resultados.....	151	

4.4.	Propuestas de medidas de seguimiento medioambientales y técnicas de remediación de aguas subterráneas	152
CAPITULO 5. Conclusiones y recomendaciones.....		182
5.1.	Conclusiones	182
5.2.	Recomendaciones	184
BIBLIOGRAFIA		186
ANEXOS.....		189
ANEXO 1.....		190
ANEXO 2.....		191
ANEXO 3.....		192
ANEXO 4.....		193
ANEXO 5.....		195

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Clasificación de zonas subsuperficiales.</i>	9
<i>Figura 2.2 El ciclo hidrológico</i>	10
<i>Figura 2.3 Elementos del flujo del agua subterránea.</i>	11
<i>Figura 2.4 Permeámetro de carga constante</i>	13
<i>Figura 2.5 Gradiente hidráulico.</i>	14
<i>Figura 2.6 Representación gráfica de porosidad eficaz.</i>	17
<i>Figura 2.7 Tortuosidad del recorrido de un líquido a través de un medio poroso</i>	17
<i>Figura 2.8 Tipos de acuíferos y pozos.</i>	21
<i>Figura 2.9 Tipos de intersticios en roca y su relación con la textura y la porosidad.</i>	22
<i>Figura 2.10 Acuíferos de espesores y conductividades diferentes e igual transmisividad.</i>	28
<i>Figura 2.11 Fuentes difusas y puntuales de contaminación de las aguas subterráneas</i>	35
<i>Figura 2.12 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.</i>	48
<i>Figura 2.13 Definición grafica de Sistemas de Información Geográfica.</i>	71
<i>Figura 2.14 Tipos de representación de la información en los SIG.</i>	75
<i>Figura 2.15 Ventana principal del SIG ILWIS 3.7</i>	79
<i>Figura 2.16 Ejemplo de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, resultado de la aplicación del método GOD y uso de un SIG.</i>	83
<i>Figura 3.1 Ubicación geográfica de la zona de estudio</i>	84
<i>Figura 3.2 Delimitación de la zona de estudio</i>	85
<i>Figura 3.3 Ubicación de la zona de estudio entre los municipios de Nejapa y Apopa</i>	86
<i>Figura 3.4 Obras que se realizaron en cierre técnico del botadero de Mariona</i>	90
<i>Figura 3.5 Fotografías que muestran la evolución del antiguo botadero de Mariona</i>	91
<i>Figura 3.6 Geología de la zona de estudio según Mapa Geológico de El Salvador</i>	93
<i>Figura 3.7 Ubicación de la zona de estudio en el mapa hidrogeológico de la cuenca del Río Acelhuate</i>	96
<i>Figura 3.8 Mapa de elevaciones de los municipios de Apopa – Nejapa</i>	97
<i>Figura 3.9 Ubicación de la zona de estudio en el mapa de cuencas de El Salvador</i>	98
<i>Figura 3.10 Ubicación de la zona de estudio en mapa de uso de suelos.</i>	99

<i>Figura 3.11 Perfil geoelectrico de un sector donde se ubica el antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 3.12 Ventana para importar datos en ILWIS 3.7.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 3.13 Ventana de configuración para creación de un mapa de puntos a partir de una tabla en ILWIS 3.7.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 3.14 Mapa de puntos del perímetro de antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 3.15 Ventana para creación de mapa de polígonos a partir de mapa de puntos en ILWIS 3.7.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 3.16 Mapa de polígonos de perímetro de antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 3.17 Ventana para conversión de formato vectorial a raster en ILWIS 3.7.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 3.18 Ventana para creación de georeferenciación en ILWIS 3.7.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 3.19 Ventana para conversión de mapa de polígonos a mapa de segmentos en ILWIS 3.7.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 3.20 Ventana para unir tablas en ILWIS 3.7.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 3.21 Ventana para interpolación por método Kringing en ILWIS 3.7.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 3.22 Ventana para intersección de mapas raster en ILWIS 3.7.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.23 Ventana para creación de mapas de atributos raster en ILWIS 3.7.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 3.24 Ventana para creación de dominio en ILWIS 3.7.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 3.25 Ventana de edición de dominio en ILWIS 3.7.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 3.26 Ventana para aplicar dominio a mapa raster en ILWIS 3.7.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 3.27 Mapa del parámetro D de GOD de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 3.28 Mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Resultado de la aplicación del método GOD.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 3.29 Mapa de recarga potencial de la cuenca del rio Acelhuate.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 3.30 Mapa del parámetro D de DRASTIC de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 3.31 Ventana para crear georeferencia de una imagen en ILWIS 3.7.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 3.32 Ventana de editor de georeferenciaciones en ILWIS 3.7.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 3.33 Ventana para creación de mapa de segmentos en ILWIS 3.7.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3.34 Ventana para poligonizar segmentos en ILWIS 3.7.....</i>	<i>136</i>

<i>Figura 3.35 Mapa del parámetro R de DRASTIC de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 3.36 Mapa de parámetro S de DRASTIC de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 3.37 Mapa de parámetro T de DRASTIC de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 3.38 Mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Resultado de la aplicación del método DRASTIC.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 4.1 Distribución de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Método GOD.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 4.2 Distribución de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Método DRASTIC.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 4.3 Impacto de la expectativa de limpieza en los costes y duración de un sistema convencional de bombeo y tratamiento.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 4.4 Los líquidos de fase no acuosa no se disuelven bien en el agua subterránea.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 4.5 Un único pozo de extracción situado en $x=0$, $y=0$, en un acuífero con flujo a lo largo del eje x.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 4.6 Curva de zona de captura para un pozo único de extracción situado en el origen, en un acuífero con velocidad de flujo v, espesor B y tasa de bombeo Q.....</i>	<i>168</i>
<i>Figura 4.7 Superposición de la pluma en una curva de zona de captura para un solo pozo de extracción.....</i>	<i>169</i>
<i>Figura 4.8 Ubicación de un único pozo de extracción por delante de una pluma de contaminante.....</i>	<i>170</i>
<i>Figura 4.9 Curvas de captura para pozos óptimamente espaciados a lo largo del eje y, bombeando a una tasa Q: (a) dos pozos; (b) tres pozos.....</i>	<i>171</i>
<i>Figura 4.10 Ubicación de dos pozos de extracción en el frente de una pluma de contaminante.....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 4.11 Manipulación del gradiente hidráulico con múltiples pozos.....</i>	<i>175</i>

Figura 4.12 Técnica de remediación de aguas subterráneas por Biorrecuperación in situ178

Figura 4.13 Barrera reactiva permeable para el tratamiento de una pluma contaminante en aguas subterráneas179

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Iones fundamentales presentes en el agua subterránea</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2.2 Valoración del índice GOD para la vulnerabilidad de un acuífero</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 2.3 Clasificación de la vulnerabilidad de acuíferos del método DRASTIC</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 2.4 Puntajes de parámetro de Profundidad al nivel freático en método DRASTIC (Dr).....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 2.5 Puntajes de Recarga Neta en método DRASTIC (Rr)</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 2.6 Puntajes para Tipo de Acuífero en método DRASTIC (Ar).....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 2.7 Puntajes para Tipo de Suelo en método DRASTIC (Sr).....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 2.8 Puntajes para Topografía o Pendiente en método DRASTIC (Tr).....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 2.9 Puntajes para parámetro Impacto de la Zona Vadosa en método DRASTIC (Ir)</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 2.10 Puntajes utilizados para la Conductividad Hidráulica en método DRASTIC (Cr).....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 2.11 Resumen de métodos para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 2.12 Elementos geográficos básicos usados por los SIG.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 2.13 Características de algunos programas SIG.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 3.1 Coordenadas y elevaciones de los puntos del perímetro de la zona de estudio</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 3.2 Litología de la cobertura para el área de San Salvador</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 3.3 Inventario de pozos cercanos a antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 3.4 Inventario de manantiales cercanos a antiguo botadero de Mariona.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 3.5 Resumen de puntajes y mapas a utilizar en método GOD.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 3.6 Valores de recarga de la zona de estudio.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 3.7 Tipos de suelo presentes en la zona de estudio</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 3.8 Determinación de la conductividad hidráulica de la zona de estudio.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 3.9 Comprobaciones a realizar para verificar mapa de segmentos en ILWIS.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 3.10 Clases de suelos según mapa pedológico de El Salvador</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 3.11 Resumen de puntajes y mapas a utilizar en método DRASTIC</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 4.1 Distribución de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Método DRASTIC</i>	<i>149</i>

<i>Tabla 4.2 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 1</i>	154
<i>Tabla 4.3 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 2</i>	155
<i>Tabla 4.4 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 3</i>	156
<i>Tabla 4.5 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 4</i>	157
<i>Tabla 4.6 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 5</i>	158
<i>Tabla 4.7 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 6</i>	159
<i>Tabla 4.8 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 7</i>	160
<i>Tabla 4.9 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 8</i>	161
<i>Tabla 4.10 Facilidad relativa de limpieza de acuíferos contaminados en función de la química del contaminante y la hidrogeología del lugar</i>	165

INTRODUCCION

En este Trabajo de Graduación se presenta el proceso y los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona, que se ubica en el límite divisorio de Nejapa y Apopa en el Departamento de San Salvador. Los métodos utilizados fueron los desarrollados en 1987 por Foster & Hirata (método GOD) y por Aller (método DRASTIC), empleando para el procesamiento de los datos el Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS en inglés) ILWIS 3.7.

Este documento se divide en 5 capítulos. En el primero se muestran las consideraciones generales tomadas en cuenta para la realización de este trabajo, como son: Los antecedentes, planteamiento del problema, objetivos, alcances, limitaciones y la justificación.

Luego en el segundo capítulo se presenta la teoría respecto a lo que son los acuíferos como: Su definición, clasificación, características principales y contaminación de estos; además de la definición e importancia de conocer la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el manejo de recursos hídricos, presentando para ello los métodos GOD y DRASTIC principalmente, ya que han sido los que se han aplicado. Finalizando este con la teoría de los SIG y su aplicación en el manejo de recursos hídricos, enfocado en el proceso de la elaboración de un mapa que muestre la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación, en donde se habla sobre el uso del ILWIS para obtener dicho mapa.

En el tercer capítulo se da una descripción general sobre la zona de estudio, indicando la ubicación geográfica, obras realizadas durante su cierre técnico, otras fuentes de contaminación, características principales de la zona de estudio como: Geología, hidrogeología, relieve, hidrología, clima, vegetación y presentación de un perfil

geoeléctrico resultado de un estudio previo. Posteriormente se muestra la información obtenida sobre los parámetros del método GOD, luego se describe el procesamiento realizado en el software ILWIS 3.7 para obtener el mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de toda la zona de estudio; así mismo se presenta para el método DRASTIC.

En el cuarto capítulo se muestra el análisis de resultados de ambos métodos y se hace un análisis comparativo. Además se proponen algunas medidas de seguimiento medioambientales de acuerdo a las fallas detectadas en las visitas al lugar; así como la teoría de diferentes técnicas de remediación de aguas subterráneas que se pudiesen aplicar en esta zona.

Finalizando con el quinto capítulo donde se mencionan las conclusiones a las se llega luego de conocer y analizar los resultados obtenidos y las recomendaciones que se proponen.

CAPITULO 1. Consideraciones Generales

1.1. Antecedentes

El concepto de vulnerabilidad de acuíferos surge en Francia en la década de 1960-1970, como la forma de ubicar ciertas actividades que significaban un riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, lo cual se visualiza mediante mapas que dan a conocer el diferente grado de protección a la contaminación que proporciona el medio que resguarda el acuífero.

Existen diversos métodos para determinar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación; pero en América Latina los métodos más usados son los desarrollados en 1987 por Foster & Hirata (método GOD) y por Aller (método DRASTIC). El método GOD se basa en la asignación de índices entre 0 y 1, a tres parámetros que son los que nominan el acrónimo GOD, los cuales son:

G = Ground water occurrence (Tipo de acuífero)

O = Overall aquifer class (Litología de la cobertura)

D = Depth (Profundidad del acuífero)

Con la multiplicación de estos tres factores se obtiene el índice de vulnerabilidad que puede variar entre 1 (vulnerabilidad máxima) y 0 (vulnerabilidad mínima).

El método DRASTIC se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10, de acuerdo a las características y el comportamiento de los parámetros considerados en el acrónimo DRASTIC:

D = Depth to water (Profundidad del acuífero)

R = Recharge (Recarga neta)

A = Aquifer media (Tipo de acuífero)

S = Soil media (Tipo de suelo)

T = Topography (Topografía)

I = Impact of the vadose zone media (Impacto del tipo de zona vadosa)

C = Hydraulic conductivity of the aquifer (Conductividad hidráulica del acuífero)

El índice 1 indica la mínima vulnerabilidad y el 10 la máxima de acuerdo al parámetro considerado; además de lo expresado, a cada parámetro se le asigna un peso o ponderación, se emplean índices entre 1 y 5 de acuerdo a la influencia respecto a la vulnerabilidad. Ambos índices se multiplican y luego se suman los 7 resultados, para obtener un valor final o índice de vulnerabilidad, cuyos extremos son 23 (mínima) y 230 (máxima).

Mediante los parámetros solicitados en cada uno de los métodos y el uso del álgebra de mapas se logra evaluar la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación. Las metodologías antes mencionadas ya han sido utilizadas en trabajos de graduación anteriormente realizados como:

1. “Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán”, por Mario Escobar, et al; dicho estudio fue desarrollado por estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA) en el 2002, en el cual se presenta teoría sobre vulnerabilidad de las aguas subterráneas, conceptos de hidrogeología y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG); además se propone una metodología para recopilar, almacenar y procesar la información de la zona en estudio, haciendo uso de información de investigaciones previas y de instituciones relacionadas con la temática; luego de haber obtenido los datos de campo de profundidad del acuífero, estratigrafía, prospecciones geofísicas y pruebas de infiltración; se evaluó la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación aplicando los métodos GOD y DRASTIC, y para la elaboración de mapas se uso el programa Sistema de Información Integrado de Tierras y Aguas 3.0 (ILWIS 3.0 en su

acrónimo en inglés). Este estudio contó con el apoyo de instituciones como la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) y Fortalecimiento Institucional de ANDA para Investigación de Aguas Subterráneas (FIAS).

2. **“Modelo conceptual y vulnerabilidad intrínseca del acuífero Quezaltepeque-Nejapa”**, por César Alvarado; tesis desarrollada por estudiante de la carrera Licenciatura en Física, de la Universidad de El Salvador (UES) en el 2007, en la cual se presenta información teórica sobre relieve nacional, geología, prospección geofísica, infiltración del agua en el suelo y vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. La metodología usada para la tesis fue una investigación de los parámetros físicos de la zona (geología, litología, precipitación, evapotranspiración, hidrogeología, etc.) y posteriormente una medición de otros parámetros in situ (nivel freático, pruebas de infiltración, entre otros). En dicho trabajo se aplica el método GOD y se hizo uso del programa Arc View GIS 3.1 (Sistema de Información Geográfico que tiene la capacidad de visualizar, explorar, consultar y analizar datos espaciales) para obtener el mapa de vulnerabilidad.

3. **“Un enfoque de gestión ambiental del recurso hídrico desde la perspectiva de la vulnerabilidad de acuíferos”**, por Gloria Cerros; investigación realizada para la Maestría en Gestión del Medio Ambiente de la UCA en el 2007, en la cual se abordan las temáticas de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, gestión ambiental y gestión integral de los recursos hídricos, problemática del recurso hídrico en el país, planificación ambiental y métodos para determinar la vulnerabilidad de acuíferos. Para la investigación se recopiló información hidrogeológica de la zona; además de realizar en campo observación de pozos, inspección de afloramientos de roca y pruebas de infiltración. Se utilizó el software SIG Arc Gis 8.3 para crear el mapa de vulnerabilidad del acuífero resultado de la aplicación del método GOD.

Además de los trabajos de graduación mencionados anteriormente que contienen información acerca de los métodos GOD y DRASTIC, se cuenta con el trabajo de graduación denominado “**Evaluación Geoeléctrica del Antiguo Botadero de Residuos Sólidos Urbanos de Mariona**”, el cual fue realizado por alumnos de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la UES en el 2009, que contiene entre otras temáticas los sondeos geofísicos, inventario de pozos cercanos que muestran el nivel freático y otros tipos de información acerca de nuestra zona de estudio.

1.2. Planteamiento del problema

El flujo de aguas subterráneas y el transporte de contaminantes no pueden ni observarse ni medirse fácilmente, no todos los perfiles de los suelos ni las condiciones hidrogeológicas son igualmente efectivos para atenuar los contaminantes. Más aún, el grado de atenuación variará ampliamente en una condición dada, según los tipos y la disposición de contaminantes.

Debido a lo dicho anteriormente, surge la necesidad de conocer la forma en que responde el medio que protege al acuífero en zonas que son focos de contaminación; y es por ello que se plantea la realización de la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el sector donde se localiza el antiguo botadero de desechos sólidos de Mariona, localizado en el límite divisorio de los municipios de Apopa y Nejapa, en el departamento de San Salvador; el cual fue habilitado por la Alcaldía de San Salvador en 1991 y cerrado en el 2002, para dar paso al uso del relleno sanitario de Nejapa, administrado por la empresa canadiense Manejo Integral de Desechos Sólidos Sociedad de Economía Mixta de Capital Variable (MIDES); y que luego de ser clausurado el botadero, ni MIDES, ni las Alcaldías involucradas se hicieron responsables del seguimiento ambiental y las actividades destinadas a la restauración del lugar fueron dañadas y posteriormente algunas de ellas desaparecieron; por lo que se considera muy importante evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la

contaminación por causa del ex botadero, debido a que además, éste no posee una membrana impermeable en la parte inferior, convirtiéndolo en un foco de contaminación para los recursos hídricos de la zona.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el sector donde se localiza el antiguo botadero de desechos sólidos de Mariona, para determinar las zonas más vulnerables a la contaminación.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Aplicar los métodos GOD y DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el sector donde se localiza el antiguo botadero de desechos sólidos de Mariona.
- Crear mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas, a través de la aplicación del método GOD y del método DRASTIC; haciendo uso para ello del SIG ILWIS 3.7.
- Comparar los resultados obtenidos de la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas por los métodos GOD y DRASTIC, para su posterior análisis.
- Exponer la importancia de determinar la vulnerabilidad de los recursos hídricos subterráneos a la contaminación, dentro del proceso de toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos.

- Proponer algunas medidas de seguimiento medioambientales que vayan enfocadas a minimizar el daño causado por este antiguo botadero y algunas técnicas de remediación de aguas subterráneas.

1.4. Alcances

En esta investigación se utilizarán los métodos GOD y DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el sector donde se localiza el antiguo botadero de desechos sólidos de Mariona, que pertenece tanto al municipio de Nejapa como al municipio de Apopa. En el inicio de la investigación se realizara un marco teórico que abordara la temática de acuíferos y la contaminación de éstos; además de la información suficiente para la comprensión de las metodologías para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, principalmente de los métodos GOD y DRASTIC. También se expondrá información general sobre Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el uso de éstos en la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos; así como las conclusiones a las que se pueden llegar partiendo de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos recopilados.

Con la aplicación de los métodos GOD y DRASTIC y haciendo uso del programa ILWIS 3.7, el cual es un software SIG gratuito, se obtendrán los mapas de vulnerabilidad, uno por cada método y así determinar las zonas más sensibles al peligro de contaminación por este antiguo botadero; además se compararan los resultados obtenidos por los dos métodos utilizados para su posterior análisis y se propondrán algunas medidas de seguimiento medioambientales que vayan enfocadas a minimizar el daño causado por la presencia de este ex botadero y técnicas de remediación de aguas subterráneas.

1.5. Limitaciones

- Este trabajo se hará en gran parte con información proporcionada por estudios ya realizados y con la colaboración de instituciones públicas; por lo que nos tendremos que condicionar a los trámites exigidos para que se nos proporcione la información necesaria en la aplicación de los métodos a utilizar.
- Debido al alto costo monetario de los programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS en su acrónimo en inglés), como ArcGIS, ArcView, Surfer, MapInfo, etc.; se usará ILWIS 3.7, el cual es un software GIS gratuito que ya ha sido utilizado en otros trabajos de graduación en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas; con la desventaja de que hace mucho más difícil el procesamiento de la información.

1.6. Justificación

En términos generales, las aguas subterráneas son de mejor calidad que las aguas superficiales, las primeras representan un recurso importante para el desarrollo socio-económico nacional; convirtiéndose en la principal fuente de abastecimiento de agua potable en nuestro país. Su explotación, se realiza a través de la perforación de pozos y mediante la captación de manantiales.

En los alrededores del antiguo botadero de Mariona, el vital líquido es usado por asentamientos humanos y por industrias que lo utilizan en sus procesos y que a la vez pueden ser posibles causantes de contaminación, como lo son las empresas: Coca Cola, Jugos Jumex e Ingenio El Ángel (Rivera y Aparicio, 2009).

Considerando que el deterioro de la calidad de las aguas subterráneas suele ser lento y zonal, permite que los problemas de alteración de la calidad se detecten transcurrido

bastante tiempo desde el inicio de la actividad contaminante, producto de las diversas actividades que potencialmente generan una carga contaminante importante al subsuelo y ocasionan un riesgo de contaminación a las aguas subterráneas.

Es por ello que debido a la problemática expuesta anteriormente, se necesita información que sea generada y utilizada como herramienta que nos permita realizar una buena gestión del recurso hídrico subterráneo, y ante tal necesidad surge el concepto de vulnerabilidad de las aguas subterráneas, el cual facilita el manejo de los recursos hídricos, contando con instrumentos prácticos que permiten conocer en cierta medida el estado del recurso y definir los aspectos que deben tenerse en cuenta para su cuidado ambiental.

En nuestro caso el antiguo botadero de Mariona genera lixiviados constantemente, generando una pluma definida de contaminación en el acuífero y se desconoce que tan vulnerable son las aguas subterráneas del lugar. De la investigación realizada por Rivera y Aparicio (2009) se conoce que el exbotadero está afectando el nacimiento del río Chacalaca, el cual provee de agua a muchas poblaciones aledañas de Apopa y Nejapa; también se ha encontrado en cuatro nacimientos cercanos alta presencia de metales pesados como: Plomo, manganeso, cadmio, níquel, aluminio, boro, nitritos, entre otros, y según Nottingham y Márquez (1998) los niveles de contaminación de éstos representan un grave riesgo para las comunidades que viven en los alrededores de esta zona.

Por lo dicho anteriormente, la realización de una evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la zona en donde se localiza el antiguo botadero de Mariona, permitiría a futuro determinar el impacto causado a las aguas subterráneas por la ubicación de éste en el lugar y así contar con información para la toma de decisiones que vendrían a ayudar a minimizar los daños generados y en cierta manera conocer el estado actual del mismo.

CAPITULO 2. Generalidades

2.1. Acuíferos

2.1.1. Introducción

El agua procedente de la lluvia fluye hacia los ríos y arroyos, y vuelve a la atmósfera por evaporación o transpiración o se filtra hacia el subsuelo para formar parte de las aguas subterráneas. Cuando el agua se filtra a través de las grietas o los poros del terreno y las rocas, pasa a través de la llamada zona insaturada, que se caracteriza por la presencia tanto de aire como de agua en los espacios intersticiales del suelo. El agua vadosa, de la zona insaturada o de aireación no está disponible para el aprovechamiento humano, es decir, no se puede bombear, si bien las plantas ciertamente absorben el agua del suelo que se encuentra cerca de la superficie. En la zona saturada los espacios intersticiales están completamente rellenos de agua. El agua de esta zona se llama agua subterránea, y su techo es el nivel freático. Hay una zona de transición entre las dos zonas mencionadas anteriormente que es la franja de capilaridad, en donde el agua sube por las pequeñas grietas como resultado de la atracción entre el agua y las superficies rocosas. La Figura 2.1 ilustra esta distribución (Gilbert M. Masters, 2008).

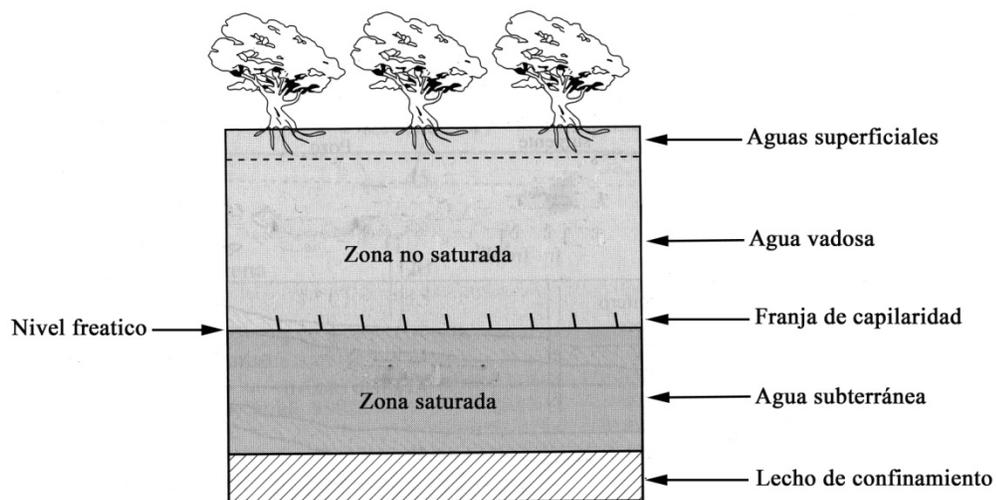


Figura 2.1 Clasificación de zonas subsuperficiales.

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 243

➤ **Ciclo hidrológico**

El hidrogeólogo debe tener una clara concepción del proceso de la naturaleza, que se conoce con el nombre de ciclo hidrológico y que ya Meinzer (1942), consideraba el concepto central de la hidrología (Custodio & Llamas, 2001). En la Figura 2.2 se presenta un esquema simplificado del ciclo hidrológico, cuya comprensión no requiere grandes explicaciones.



Figura 2.2 El ciclo hidrológico

Fuente: http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2002/01march_water.htm

➤ **Concepto y origen del agua subterránea**

El agua subterránea constituye una porción del agua que circula a través del ciclo hidrológico; esta proviene de la infiltración o percolación a través de la superficie de la tierra, después de lo cual se transporta lentamente a grandes distancias hasta que nuevamente regresa a la superficie por acción del flujo natural, de las plantas o el hombre.

El agua subterránea origina el agua superficial y a la inversa, como se muestra en la Figura 2.3. Es importante mencionar que al agua subterránea le corresponde el 25.7%

del total de agua dulce y 98.4% del agua dulce no congelada en la hidrosfera (Davis, 2005, p. 218), por lo que representa una fuente importante para el suministro de agua en el mundo.

Las descargas del agua subterránea ocurren cuando el agua emerge; cuando fluye hacia el mar o a la superficie en forma de fuentes, ríos y lagos. Dentro del ciclo hidrológico el agua subterránea muy cercana a la superficie puede evaporarse en la tierra y por la transpiración de la cobertura vegetal.

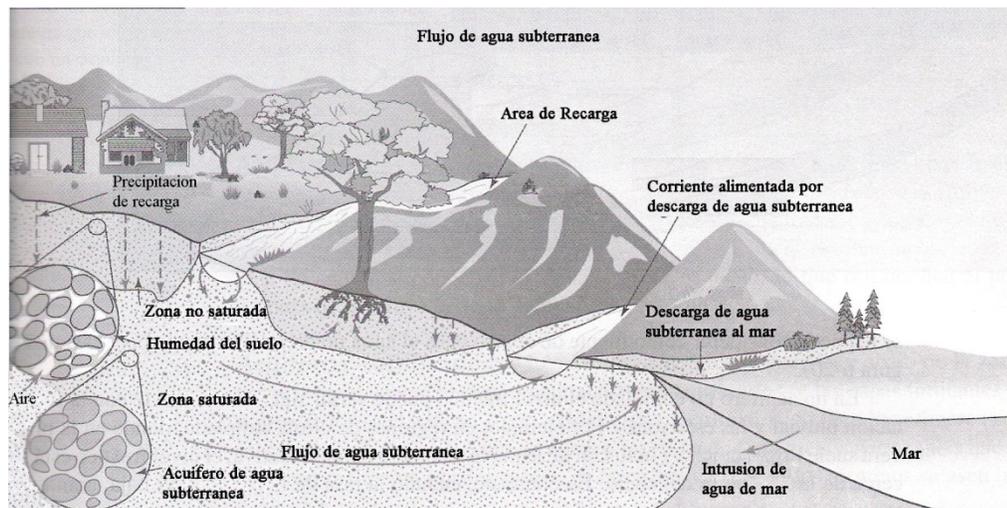


Figura 2.3 Elementos del flujo del agua subterránea

Fuente: Gloria Cerros. Un enfoque de gestión ambiental del recurso hídrico desde la perspectiva de la vulnerabilidad de acuíferos. 2007. p.42

Podemos decir también que el agua subterránea es el agua que circula en la zona saturada de los acuíferos y que es posible de captar por obras de ingeniería (pozos, drenes, etc.). Un acuífero es una capa geológica saturada suficientemente permeable para permitir el flujo de agua a su través. Se sienta sobre una base o lecho de confinamiento, que es una capa relativamente impermeable que limita el movimiento del agua; cómo podemos ver el concepto de aguas subterráneas esta estrechamente relacionado con el de acuífero, temática que se abordara más adelante.

➤ **Concepto de hidrogeología.**

La hidrogeología es una rama de las ciencias geológicas, que estudia las aguas subterráneas en lo relacionado con su circulación, sus condicionamientos geológicos y su captación; así su definición dice “La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación” (Mijailov, 1985, p. 285).

Actualmente los estudios hidrogeológicos son de especial interés no sólo para la provisión de agua a la población, sino también para entender el ciclo vital de ciertos elementos químicos, como así también para evaluar el ciclo de las sustancias contaminantes, su movilidad, dispersión y la manera en que afectan al medio ambiente, por lo que esta especialidad se ha convertido en una ciencia básica para la evaluación de sistemas ambientales complejos. El abordaje de las cuestiones hidrogeológicas abarcan: la evaluación de las condiciones climáticas de una región, su régimen pluviométrico, la composición química del agua, las características de las rocas como permeabilidad, porosidad, fisuración, su composición química, los rasgos geológicos y geotectónicos; es así que la investigación hidrogeológica implica, entre otras, tres temáticas principales:

1. El estudio de las relaciones entre la geología y las aguas subterráneas.
2. El estudio de la química de las aguas subterráneas (hidroquímica e hidrogeoquímica).
3. El estudio de los procesos que rigen los movimientos de las aguas subterráneas en el interior de las rocas y de los sedimentos.

➤ **Flujo en medios porosos: Ley de Darcy**

Experiencia de Darcy.

En 1856, en la ciudad francesa de Dijon, el Ingeniero Henry Darcy fue encargado del estudio de la red de abastecimiento a la ciudad. Parece que también debía diseñar filtros de arena para purificar el agua, así que se interesó por los factores que influían en el flujo del agua a través de los materiales arenosos, y presentó el resultado de sus trabajos como un apéndice a su informe de la red de distribución. Ese pequeño apéndice ha sido la base de todos los estudios físico-matemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea.

En los laboratorios actualmente se dispone de aparatos muy similares al que utilizó Darcy, y que se denominan permeámetros de carga constante (Figura 2.4).

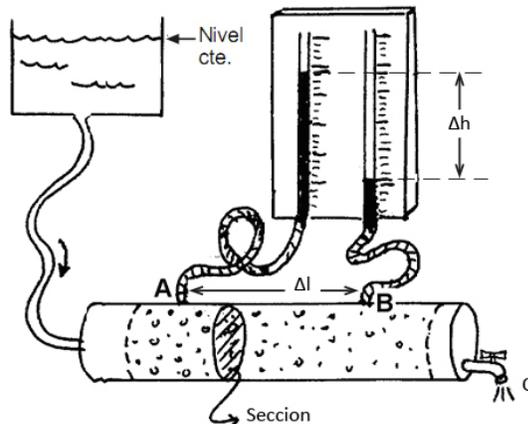


Figura 2.4 Permeámetro de carga constante

Fuente: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T080.pdf>

Donde:

Q = Caudal

Δh = Diferencia de Potencial entre A y B

Δl = Distancia entre A y B

Gradiente hidráulico = $\Delta h / \Delta l$

Básicamente un permeámetro es un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua conectando a uno de sus extremos un depósito elevado de nivel constante. En el otro extremo se regula el caudal de salida mediante un grifo que en cada experimento mantiene el caudal también constante. Finalmente, se mide la altura de la columna de agua en varios puntos (como mínimo en dos, como en la Figura 2.4).

Darcy encontró que el caudal que atravesaba el permeámetro era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico. Gradiente, es el incremento de una variable entre dos puntos del espacio, en relación con la distancia entre esos dos puntos. Si la variable considerada fuera la altitud de cada punto, el gradiente sería la pendiente entre los dos puntos considerados (ver Figura 2.5).

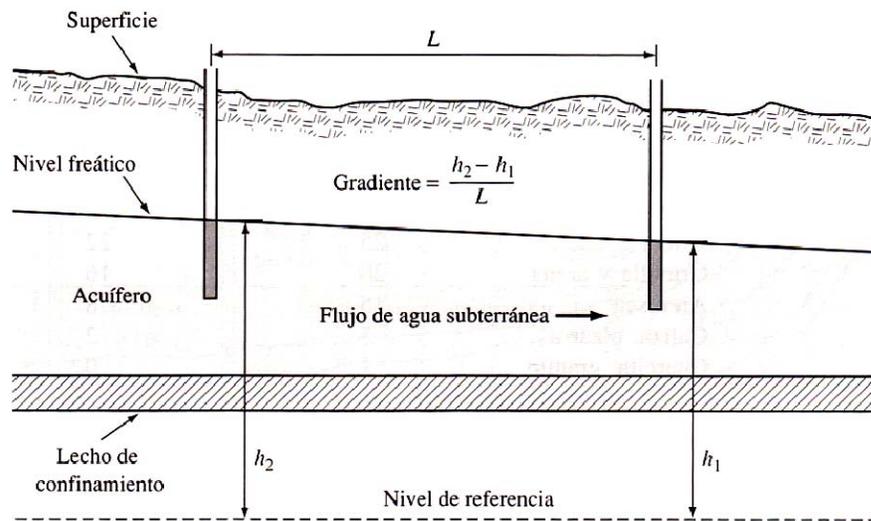


Figura 2.5 Gradiente hidráulico

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 246

Si el flujo de la Figura 2.5 va de izquierda a derecha en el plano de la página, el gradiente hidráulico (i) se calcula por la Fórmula 2.1.

$$i = \Delta h / L \quad (2.1)$$

Que viene a significar la pendiente de la superficie piezométrica entre 2 puntos.

En laboratorio, el permeámetro se sitúa verticalmente y con el flujo ascendente para facilitar la evacuación del aire contenido inicialmente en el material poroso. Es decir; variando el caudal con un grifo y/o moviendo el depósito elevado, los niveles del agua en los tubos varían. Podemos probar también con permeámetros de distintos diámetros y midiendo la altura de la columna de agua en puntos más o menos próximos. Pues bien: cambiando todas las variables, siempre que utilicemos la misma arena, entonces se cumple con la relación de la Ecuación 2.2.

$$Q = K \cdot \text{Seccion} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (2.2)$$

(K = Constante. Ver Figura 2.4 para el significado de las otras variables).

Si utilizamos otra arena (más gruesa o fina, o mezcla de gruesa y fina, etc.) y jugando de nuevo con todas las variables, se vuelve a cumplir la ecuación anterior, pero la constante de proporcionalidad lineal es otra distinta. Darcy concluyó, por tanto, que esa constante era propia y característica de cada arena. Esta constante se llamó permeabilidad (K) aunque actualmente se denomina conductividad hidráulica.

Como el caudal Q está en L³/T, la sección es L², Δh y Δl son longitudes, se comprueba que las unidades de la permeabilidad (K) son las de una velocidad (L/T).

Actualmente, la Ley de Darcy se expresa como se indica en la Formula 2.3

$$q = -K \left(\frac{dh}{dl} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

q = Q / sección (es decir: caudal que circula por m² de sección)

K = Conductividad Hidráulica

dh/dl = Gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales (el signo menos se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección es hacia los Δh decrecientes; es decir, que Δh o dh es negativo y, por tanto, el caudal será positivo).

Velocidad real y velocidad de Darcy

Sabemos que en cualquier conducto por el que circula un fluido se cumple que:

$$Caudal = Seccion \times Velocidad \quad (2.4)$$

Si aplicamos esta consideración al cilindro del permeámetro de Darcy, y calculamos la velocidad a partir del caudal y de la sección, que son conocidos, obtendremos una velocidad falsa, puesto que el agua no circula por toda la sección del permeámetro, sino solamente por una pequeña parte de ella. A esa velocidad falsa (la que llevaría el agua si circulara por toda la sección del medio poroso) se denomina “velocidad Darcy” o “velocidad de flujo”:

$$Velocidad \ Darcy = \frac{Caudal}{Seccion \ total} \quad (2.5)$$

La parte de la sección total por la que puede circular el agua es la porosidad eficaz; si una arena tiene una porosidad del 10% (0.10), el agua estaría circulando por el 10% de la sección total del tubo. Y para que el mismo caudal circule por una sección 10 veces menor, su velocidad debería ser 10 veces mayor. Por tanto, se cumplirá que:

$$Velocidad \ lineal \ media = \frac{Velocidad \ Darcy}{\eta_e} \quad (2.6)$$

Donde:

η_e = porosidad eficaz

Denominamos velocidad lineal media, y no velocidad real, al resultado de la Formula 2.6, debido a lo siguiente: esa fórmula refleja correctamente la velocidad real de las partículas en una sección cualquiera del medio poroso, por ejemplo, en la mostrada en la Figura 2.6, pero no es exacta para calcular con ella el tiempo de recorrido entre dos puntos.

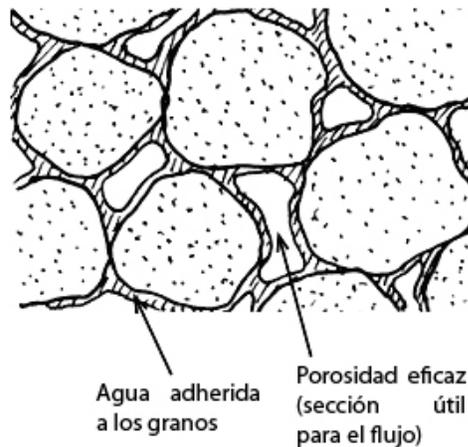


Figura 2.6 Representación gráfica de porosidad eficaz
 Fuente: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T080.pdf>

En la Figura 2.7 se muestra un tubo de longitud L_1 lleno de arena por el que se hace circular agua. Calculamos la velocidad lineal media mediante las Formulas 2.5 y 2.6, y con esa velocidad evaluamos el tiempo de recorrido a lo largo del tubo de dicha figura (tiempo= L_1 / velocidad). Si después medimos experimentalmente ese tiempo de recorrido añadiendo un colorante al agua, obtendríamos un tiempo ligeramente superior, ya que la distancia recorrida ha sido mayor: no L_1 sino L_2 (que es desconocida).

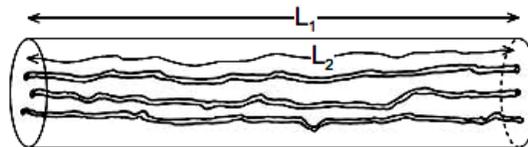


Figura 2.7 Tortuosidad del recorrido de un líquido a través de un medio poroso
 Fuente: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T080.pdf>

Si llamamos velocidad real a la registrada a lo largo de un recorrido a través de un medio poroso, ésta sería igual a:

$$\text{Velocidad Real} = \text{Velocidad lineal media} \times \text{coeficiente} \quad (2.7)$$

Ese coeficiente depende de la tortuosidad del medio poroso, y aproximadamente puede ser de 1.0 a 1.2 en arenas.

En la práctica, habitualmente se utiliza la Formula 2.6, diciendo que hemos calculado la “velocidad real”, pero debemos ser conscientes del error que se comete al despreciar la tortuosidad del recorrido.

2.1.2. Clasificación de acuíferos

Es importante previo a hablar de clasificaciones de acuíferos, hacer mención de las formaciones geológicas que pueden o no contener agua en ellas, y estas las podemos clasificar debido a sus características litológicas, por lo que podemos mencionar:

- Acuífero
- Acuicludo
- Acuitardo
- Acuífugo

Acuífero: Del latín aqua=agua y fero=llevar, se denomina acuífero a aquel estrato o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades (Custodio & Llamas, 2001, p. 259).

Acuícludo: Del latín claudere que significa encerrar o cerrar, se define como aquella formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Dentro de este grupo podemos incluir los cienos y legamos (arcillas por lo general) de origen deltaico y/o estuario. Que a pesar de poseer enormes cantidades de agua (superiores al 50% en volumen) no son hidrogeológicamente aptas para construcción de captaciones de aguas subterráneas (Custodio & Llamas, 2001, p: 260).

Acuitardo: Del latín tardare que significa retardar, hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros ciertos casos. Por ejemplo un nivel de arcillas limosas o arenosas, puede comportarse como un acuitardo, si esta dispuesto encima o debajo de un acuífero más importante, al cual puede recargar, o incluso recibir agua del mismo (Custodio & Llamas, 2001, p: 260).

Acuífugo: Del latín fugere que significa huir, son aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo, un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación (Custodio & Llamas, 2001, p: 260).

Los acuíferos los podemos clasificar por la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos, y dentro de esta clasificación podemos señalar:

- Acuíferos libres no confinados o freáticos
- Acuíferos cautivos confinados o a presión
- Acuíferos semicautivos o semiconfinados

Acuíferos libres no confinados o freáticos: Son aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto a presión atmosférica (Custodio & Llamas, 2001, p: 264). La superficie libre se conoce como superficie freática y el nivel a que ella se eleva, respecto a otro de referencia, nivel freático. Está formado en general por un estrato permeable parcialmente saturado de agua que yace sobre otro estrato impermeable o relativamente impermeable.

Acuíferos cautivos, confinados o a presión: El agua de éstos se encuentra sometida a cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándolo totalmente (Custodio & Llamas, 2001, p. 264).

Acuíferos semicautivos o semiconfinados: pueden considerarse como un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que el muro y/o el techo que los encierra no sea totalmente impermeable sino un acuitardo, es decir un material que permita una filtración vertical de agua, muy lenta, que alimente el acuífero principal en cuestión, a partir de un acuífero o masa de agua situado encima o debajo del mismo (Custodio & Llamas, 2001, p. 265).

La ilustración de la Figura 2.8 muestra un acuífero libre, un pozo perforado hasta la zona saturada de tal acuífero, tendrá agua a la presión atmosférica en el nivel freático. El agua subterránea contenida en un acuífero cautivo, que es aquel encerrado entre dos capas de confinamiento; puede estar bajo presión, de modo que en un pozo perforado en dicho acuífero; el agua alcanzará una altura mayor del nivel a que se encuentra confinada, en cuyo caso se denomina pozo artesiano. El nivel que alcanza el agua en un pozo artesiano se denomina: nivel piezométrico. En algunas circunstancias el agua puede alcanzar la superficie del pozo e incluso superarla sin necesidad de bombeo, debido a la presión del acuífero confinado. En tal caso se llama pozo artesiano surgente. En la Figura 2.8 también se muestra una capa impermeable en medio de la zona no saturada, sobre la

masa de agua principal. El agua que se filtra hacia abajo es atrapada por esta capa y crea un acuífero suspendido.

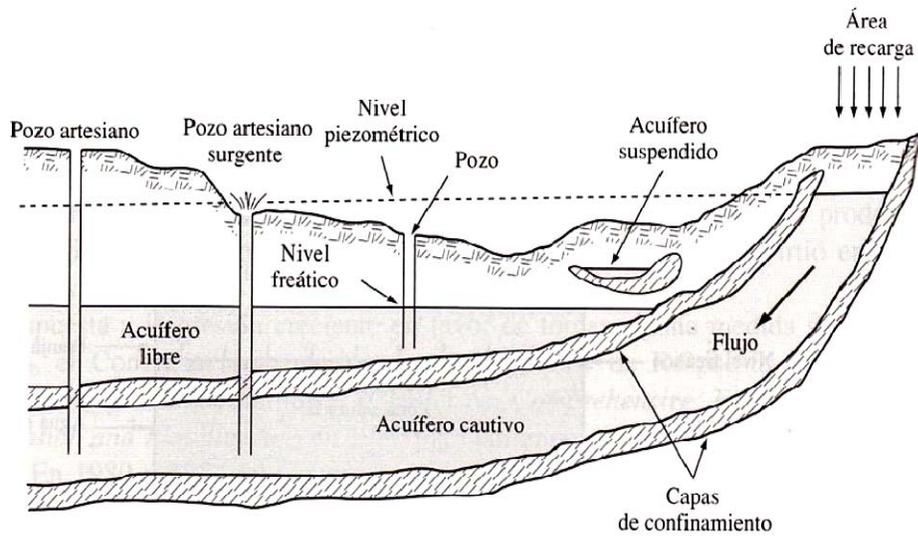


Figura 2.8 Tipos de acuíferos y pozos.

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 244

2.1.3. Características y propiedades generales de los acuíferos

No todas las formaciones geológicas, o rocas en general, poseen, la misma facilidad para transmitir y proporcionar agua en cantidades apreciables económicamente; es por ello que los acuíferos tienen ciertas características que los diferencian de otras formaciones geológicas. Estas características y propiedades permiten definir y en algunos casos, predecir, el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a unas determinadas acciones exteriores (Custodio & Llamas, 2001).

Los intersticios de la roca, son como los caminos por los que pasa el flujo de agua subterránea y se clasifican en:

Poros: son los intersticios intergranulares que hay entre los granos de los sedimentos clásticos consolidados y no consolidados o en las tobas volcánicas sueltas (Figura 2.9A).

Fisuras: son fracturas o grietas en las rocas (Figura 2.9B) y *Cavidades*: presentes en las rocas carbonatadas y en los tubos de lava de las rocas volcánicas (Figura 2.9C).

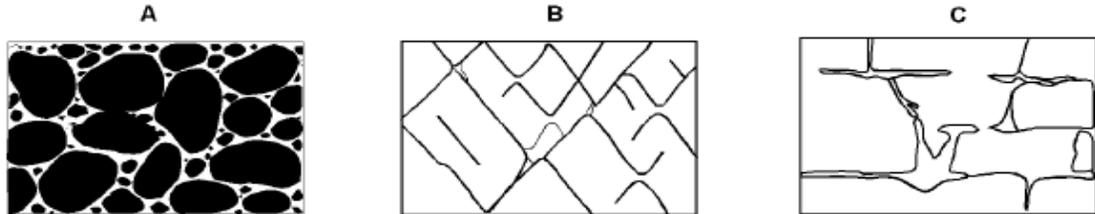


Figura 2.9 Tipos de intersticios en roca y su relación con la textura y la porosidad.

(A) Depósitos sedimentarios con una elevada porosidad, (B) rocas porosas por fisuración, y (C) rocas porosas debido a fracturas disueltas.

Fuente: <http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/documents/LIBRO%20IS%C3%93TOPOS/PDF%20Isotopos-IV/Seccion%20IV-%201.pdf>

Como es evidente, no todas las formaciones geológicas poseen las propiedades que caracterizan a un acuífero, es decir, que sus intersticios o espacios huecos, sean capaces de almacenar el agua y de servirle de conductos a la vez para transmitirla, permitiendo su aprovechamiento para satisfacer las necesidades del hombre. Desde este punto de vista, el concepto de acuífero es en cierto modo relativo, ya que una formación geológica que sea capaz, por ejemplo, de producir 1 l/s, no se considerará como acuífero, en un lugar donde haya otras en que sea posible captar 50 l/s o más; pero en una región árida, donde no haya otras posibilidades, a pesar del ínfimo caudal, esa formación que brinda 1 l/s, para resolver las necesidades de una pequeña población, constituye sin duda un acuífero, aunque pobre.

Las formaciones geológicas que constituyen acuíferos pueden incluirse en uno de estos dos grupos:

- I. Acuíferos formados por depósitos no consolidados.
- II. Acuíferos formados por rocas consolidadas.

Los acuíferos formados por depósitos no consolidados, están constituidos por materiales sueltos, fundamentalmente, arenas, gravas o mezclas de ambas de origen geológico muy diverso. Según Todd (1959) el 90% de los acuíferos en explotación en el mundo, caen bajo esta categoría.

Los acuíferos formados por rocas consolidadas pueden presentarse en:

- a) Calizas y dolomías (fisuradas, fracturadas y karstificadas).
- b) Conglomerados o areniscas (disueltas y con algunas partes cementadas).
- c) Rocas volcánicas alteradas (escoriáceas)
- d) Algunas rocas cristalinas (granitos fracturados, por ejemplo)

Los parámetros a estudiar de los acuíferos son concretamente: La porosidad, la permeabilidad, transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

Porosidad

La cantidad de agua que puede almacenarse en un acuífero depende de la porosidad del suelo o la roca que lo constituye. La porosidad (η) se define como la razón del volumen de huecos al volumen total del material:

$$Porosidad (\eta) = \frac{Volumen \ de \ huecos}{Volumen \ Total} \quad (2.8)$$

La porosidad indica la capacidad de retener agua de una formación geológica, pero no es un buen indicador de la cantidad total de agua que puede extraerse de ella. Parte de esta quedara retenida como una película en la superficie de las rocas y en pequeñas grietas y aberturas. La cantidad de agua real que puede recuperarse de un acuífero libre por unidad de volumen se denomina el rendimiento específico, o la porosidad efectiva. Los valores de porosidad y rendimiento específico se ven afectados por el descenso de

presión que se produce cuando el agua va siendo extraída, así para calcular el rendimiento es necesario introducir otro término: el coeficiente de almacenamiento (Masters y Ela, 2008).

Los poros pueden ser el resultado de procesos muy diferentes; unos (porosidad primaria) se originan al mismo tiempo que las rocas en los que se encuentran, por ejemplo los que existen entre los diversos fragmentos que constituyen una roca detrítica (arena de una playa o de una duna, depósitos aluviales de un río, etc.); otros (porosidad secundaria) se originan con posterioridad a la formación de la roca y a menudo por procesos completamente diferentes a los que dieron origen a aquella, por ejemplo, fisuras o diaclasas en una roca fracturada, o lo que quizás es mejor conocido, la red de conductos y cavidades producida por disolución de rocas solubles (simas, sumideros o cuevas).

En la porosidad influyen varios factores, entre los que se puede distinguir los siguientes:

- a) Forma de los granos, que determina la forma y dimensiones de los poros.
- b) Disposición de los granos.
- c) Tamaño del grano

En la práctica no se encuentra uniformidad en los granos. Por procesos de tamizado y sedimentación se establece la granulometría del material, aunque la determinación de la porosidad a partir de su granulometría es muy difícil de determinar, si se considera que alguno de los factores determinantes de la porosidad; no quedan reflejados en una granulometría, lo que hace que los valores hallados a través de ensayos de este tipo deben tomarse con mucha reserva.

Cuando hablamos de porosidad también debemos mencionar la porosidad efectiva, donde ésta representa más que una porción a menudo pequeña de la porosidad total, y se

define como el volumen de agua contenido en una roca, liberada por la acción de la gravedad y que se denomina V_{al} (volumen de agua libre). La porosidad efectiva, esta expresada por la Ecuación 2.9.

$$\eta_e = \frac{V_{al}}{V_{tot}} \times 100 \quad (2.9)$$

Donde:

η_e = Porosidad efectiva

V_{al} = Volumen de agua libre

V_{tot} = Volumen total

Permeabilidad o conductividad hidráulica

La permeabilidad la podemos definir como la facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, en este caso el agua. El movimiento del agua de un punto a otro del material tiene lugar cuando se establece una diferencia de presión o carga entre dos puntos. El concepto “permeabilidad” es utilizado con mucha más frecuencia que coeficiente de permeabilidad por lo que no hay que confundirse cuando se usen los dos términos ya que se refieren a lo mismo.

La ley que regula el movimiento de las aguas subterráneas midiendo el caudal Q en función de la permeabilidad de los materiales estudiados equivale a:

$$Q = kA \frac{h}{l} \quad (2.10)$$

La Ecuación 2.10 se cita aquí sólo para definir el concepto de permeabilidad y obtener sus unidades: Despejando el valor de k en la fórmula anterior se comprueba que las unidades de k son las de una velocidad (longitud/tiempo). En el Sistema Internacional

serían m/seg., pero para manejar números más cómodos, por tradición se continúa utilizando m/día. En Geotecnia y otras ramas de ingeniería se utiliza el cm/seg.

Los factores que determinan la permeabilidad pueden ser intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos son los propios del acuífero y dependen del tamaño de los poros. Los factores extrínsecos son los que dependen del fluido y son fundamentalmente su viscosidad y su peso específico. La viscosidad de un fluido es la medida de la fuerza resistente, por unidad de área y por unidad de gradiente de velocidad transversal a la dirección del movimiento del fluido. Tanto la viscosidad como el peso específico dependen de la temperatura, por lo que en casos especiales debe tenerse en cuenta ésta, sobre todo por la notable influencia de la viscosidad en la permeabilidad.

Diversos experimentos (Scheidegger, 1957) han establecido una relación entre la conductividad hidráulica darciana (k_D), las propiedades del fluido y una característica intrínseca del medio que es independiente del fluido que circula a través de él. Esa característica se denomina **permeabilidad intrínseca o geométrica** y se representará por el símbolo k . La ecuación que relaciona k_D con k se puede expresar como:

$$k_D = \frac{\gamma}{\mu} k = \frac{g}{\nu} k \quad (2.11)$$

Y también:

$$k = \frac{\nu}{g} K_D \quad (2.12)$$

Donde:

γ , peso específico absoluto del fluido (unidades de fuerza/longitud³)

μ , viscosidad dinámica del fluido (unidades de (fuerza tiempo)/longitud²)

g , aceleración de la gravedad (unidades de longitud/tiempo²)

ν , viscosidad cinemática del fluido (unidades de longitud²/tiempo)

Por otra parte, el autor Pérez Franco (1978) ha demostrado que al considerar el flujo en medios porosos en su forma más general no lineal, es necesario tomar en consideración un nuevo parámetro adimensional característico de cada medio, o sea una nueva propiedad intrínseca, que por analogía con el flujo en tuberías denomina rugosidad equivalente, y que se representa por el símbolo “C”. Esta propiedad está relacionada con la conductividad hidráulica turbulenta (K_T) por la Fórmula 2.13.

$$K_T = \left(\frac{gk^{\frac{1}{2}}}{C} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

La permeabilidad estimada mediante un análisis granulométrico o medida directamente en el laboratorio por medio de un ensayo de flujo, puede utilizarse en algunos casos como guía para estimar el rendimiento de un pozo. Sin embargo, las estimaciones deben hacerlas personas familiarizadas con la tecnología de los pozos y del agua subterránea (Johnson División OUP Inc, 1975).

Transmisividad

Concepto introducido por Theis en 1935, se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho unitario y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unitario a una temperatura fija determinada; es decir que es el producto del espesor saturado del acuífero y la conductividad hidráulica (Custodio y Llamas, 2001). Este coeficiente es representando por la letra T y puede determinarse mediante ensayos de bombeo. Cuando el coeficiente es introducido a la ecuación de Darcy (Ecuación 2.2), el flujo a través de cualquier sección transversal vertical de acuífero viene expresado por (Johnson División OUP Inc, 1975):

$$Q = TIW \quad (2.14)$$

Donde I es el gradiente hidráulico y W es el espesor del acuífero a través del cual tiene lugar el flujo.

Si observamos la Figura 2.10 intuimos que los dos estratos acuíferos deben proporcionar el mismo caudal: uno tiene la mitad de permeabilidad, pero el doble de espesor que el otro.

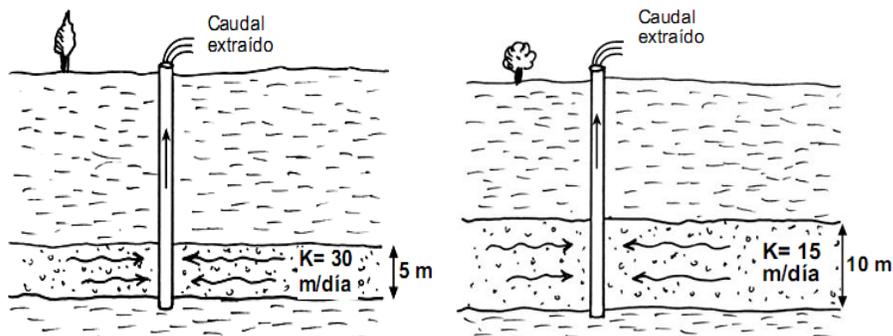


Figura 2.10 Acuíferos de espesores y conductividades diferentes e igual transmisividad

Fuente: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/T075.pdf>

Efectivamente, el parámetro que nos indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica, es una combinación de la permeabilidad y del espesor, siendo para este ejemplo la transmisividad en ambos casos de $150 \text{ m}^2/\text{día}$

Coefficiente de almacenamiento

Hay dos tipos de acuíferos desde el punto de vista de la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos: el acuífero freático, que tiene el techo a la presión atmosférica, y el acuífero confinado, que tiene en su techo una capa confinante. Si disminuye la presión hidrostática de un acuífero confinado, por ejemplo por la extracción de agua subterránea, aumenta el peso a soportar por el acuífero y la presión que resulta, expulsa cierta cantidad de agua del acuífero. Al mismo tiempo, el descenso de la presión produce una pequeña expansión y consiguiente liberación de agua. La capacidad de producir agua de un acuífero cautivo se expone mediante el coeficiente de almacenamiento.

El coeficiente de almacenamiento se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica; (Custodio & Llamas, 2001) y se expresa como se muestra en la Ecuación 2.15.

$$S = g.d(\eta_e.\beta_{liq} + \beta_{roca}) \quad (2.15)$$

Donde, S es el coeficiente de almacenamiento y no tiene dimensiones, g es la aceleración de la gravedad, d es el espesor del acuífero, η_e es la porosidad eficaz; β_{liq} y β_{roca} son respectivamente los coeficientes de compresibilidad del agua y de la roca. En acuíferos cautivos entran en juego efectos mecánicos de compresión del terreno o de la propia agua.

2.1.4. Caracterización físico-química del agua subterránea

Podemos encontrar tanto características químicas como físicas del agua, cada una de estas es importante en el estudio de las aguas subterráneas, ya que nos permite establecer si un agua es adecuada para consumo humano, o para qué tipo de usos es que puede llegar a ser beneficiosa en diversas actividades antrópicas. A continuación mencionamos de forma resumida lo más importante referente a la química y física del agua subterránea, iniciando con las principales sustancias disueltas que se encuentran presentes en el agua subterránea.

Sustancias disueltas en el agua subterránea

La mayoría de sustancias disueltas en el agua subterránea se encuentran en estado iónico, algunos de estos iones se encuentran disueltos casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos; estos se describen en la Tabla 2.1 (Custodio & Llamas, 2001).

Los iones menores más importantes que suelen estar en concentraciones entre 0.01 y 10 ppm son: anión nitrato (NO_3^-), ión carbonato (CO_3^{2-}), catión potasio (K^+), catión ferroso (Fe^{2+}), ión nitrito (NO_2^-), ión fluoruro (F^-), ión amonio (NH_4^+) y Ion estroncio (Sr^{2+}). También hay que mencionar otros que se encuentran en concentraciones entre 0.0001 y 0.1 ppm, y los cuales son: ión bromuro (Br^-), ión sulfuro (S^{2-}), catión fosfato (PO_4^{3-}), ión borato diácido (BO_3H_2^-), ión nitrito (NO_2^-), ión hidróxido (OH^-), ión yoduro (I^-), ión férrico (Fe^{3+}), ión manganeso (Mn^{2+}), ión amonio (NH_4^+), ión hidruro (H^-), ión aluminico (Al^{3+}); entre otros.

Tabla 2.1 Iones fundamentales presentes en el agua subterránea

Aniones		Cationes	
Cloruro	Cl^-	Sodio	Na^+
Sulfato	SO_4^{2-}	Calcio	Ca^{2+}
Bicarbonato	CO_3H^-	Magnesio	Mg^{2+}

Fuente: Emilio Custodio y Manuel Llamas. Hidrológica subterránea. 2001 p: 200

Lo dicho anteriormente aplica en aguas subterráneas naturales, pero en aguas contaminadas las circunstancias pueden cambiar notablemente. El agua subterránea llamada dulce, contiene como máximo 1000 o quizás 2000 ppm de sustancias disueltas; pero si el contenido es mayor, por ejemplo hasta 5000 ppm se llaman aguas salobres y hasta 40000 aguas saladas (Custodio & Llamas, 2001).

Características físicas

Dentro de este tipo de características podemos mencionar (Custodio & Llamas, 2001):

- Temperatura: Potencial calorífico referido a un cierto origen, por ejemplo la temperatura de fusión del hielo. Las aguas subterráneas tienen una temperatura muy poco variable, y responde a la media natural de las temperaturas atmosféricas del lugar, lo que se puede llegar a determinar por medio de termómetro o con un termistor.

- Conductividad y resistividad: Conductividad es la capacidad de un agua para conducir electricidad y resistividad, es la recíproca de la conductividad. La conductividad se puede medir por medio de un conductímetro o resistímetro portátil.
- Densidad: Se define como la medida de cuánta masa hay contenida en una unidad de volumen; esta varía con la temperatura y crece con la salinidad. Se puede determinar en laboratorio pesando un matraz aforado, en campo suele hacerse con areómetro.
- Color: Capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible, en general esta originado por materiales orgánicos de formaciones carbonosas o suelos vegetales, y se puede determinar por medio de una solución que contiene 1 g de cloruro de cobalto (Cl_1Co), 12545 g de Cloroplatinato de potasio (Cl_6PtK_2) y 100 cc de hidruro de cloro (ClH) concentrado, diluyendo el conjunto a 1 litro.
- Turbidez o turbiedad: Dificultad de un agua para transmitir la luz; mide el contenido en materias coloidales y la materia en suspensión muy fina y difícil de sedimentar y filtrar. Se determina por medio de una comparación con una serie de preparaciones con ácido silícico o con mastic.
- Materia en suspensión: Contenido en materiales sedimentables o que puede ser retenido por un filtro. Las aguas subterráneas en general no contienen materia en suspensión solo en circunstancias kársticas, por lo que para determinar esta característica basta con recoger sedimento en un decantador aforado, o pesar residuo que queda en el filtro, después de secado.
- Sabor: Esta característica es una determinación organoléptica subjetiva, de interés en agua potable.

Características químicas y fisicoquímicas del agua

Las características a mencionar en este apartado son (Custodio & Llamas, 2001):

- Concentración de hidrogeniones: Es el coeficiente expresado en concentración de iones de hidrógeno. Indican el grado de acidez o alcalinidad de un medio; este coeficiente se puede determinar en laboratorio por medio de un pH-metro, también colorimétricamente disponiendo de una serie de indicadores; en campo se puede obtener con un pH-metro portátil o colorimétricamente.
- Residuo seco y total de sales disueltas: El residuo seco es el peso de materiales resultante de evaporar 1 litro de agua. El total de sales disueltas mide el peso de todas las sustancias disueltas en el agua sean o no volátiles.
- Alcalinidades TAC y TA: La alcalinidad es la capacidad de un agua para neutralizar ácidos. La alcalinidad TAC mide la capacidad hasta pH=4.5 y la alcalinidad TA hasta pH= 8.3. Miden el contenido de aniones hidrolizables; para obtener el valor de la alcalinidad TAC, se determina por valoración con SO_4H_2 , y la alcalinidad TA con sulfato diácido (SO_4H_2).
- Acidez: Es la capacidad de un agua para neutralizar bases; es raro que las aguas naturales tengan acidez, pero puede producir acidez la oxidación de sulfuros, hidrólisis de iones de Fe, Al y del NH_4^+ .
- Dureza total, permanente y temporal o carbonatada: La dureza mide la capacidad de un agua para consumir jabón o producir incrustaciones. Podemos decir que la dureza total es el contenido total en cationes de $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$; dureza permanente es el contenido total en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ después de ebullición; y dureza temporal o carbonatada es el total de calcio y magnesio asociados a CO_3H^- y $\text{CO}_3^{=}$.

- Demanda química de oxígeno o materia orgánica: Medida de la cantidad de oxígeno necesario para eliminar la materia orgánica contenida en un agua mediante procesos biológicos aerobios. Comúnmente se refiere a 5 días. Es una medida importante de contaminación y debe referirse a un cierto tiempo.
- Demanda de color y break-point: Es una medida del contenido en materia orgánica y tiene mucho interés en tratamiento de esterilización de aguas para abastecimiento.

2.1.5. Contaminación de acuíferos

En los últimos años ha tomado gran relevancia el estudio de las aguas subterráneas, ya que estas disponen la mayor parte del recurso hídrico dulce que puede ser usado en diferentes actividades por el ser humano; pero actualmente ya no sólo se trata de cómo encontrar agua, este vital líquido se encuentra afectado por las diferentes actividades humanas que han producido que la calidad de este ya no sea la misma que en el pasado, y es por medio del estudio de acuíferos y estudio de las diferentes fuentes de contaminación de éstos, que podemos llegar a entender en qué forma evitar que las aguas subterráneas sigan siendo contaminadas o por lo menos predecir la evolución del problema.

Las causas de la contaminación de las aguas pueden ser de dos tipos:

- Contaminación debida a causas naturales
- Contaminación debida a actividades humanas

La contaminación debido a causas naturales se debe principalmente a sustancias químicas como el arsénico y flúor que se originan a partir de la disolución en los sedimentos de partículas de origen volcánico que se depositaron en diferentes regiones

durante las últimas decenas de miles años; pero también podemos encontrar en menor medida carbonatos de sodio y magnesio, que dan dureza al agua y se depositan en forma de sarro en las superficies metálicas, losas, vidrios, etc.

Sobre la contaminación debido a actividades humanas podemos mencionar la ocasionada por:

- ✓ Residuos sólidos urbanos
- ✓ Aguas residuales
- ✓ Actividades agrícolas
- ✓ Ganadería
- ✓ Actividades industriales y mineras
- ✓ Otras

Existen diferentes tipos de procesos contaminantes que pueden afectar las aguas subterráneas, y entre ellas podemos mencionar (Figura 2.11):

- Procesos que suelen provocar contaminación puntual: Son aquellos procesos en los que existe un punto de emisión concreto.
- Procesos que suelen provocar contaminación difusa: Se refieren a la descarga de contaminantes en el medio, a partir de una serie de puntos dispersos o amplias superficies cuyo control y detección suelen ser difíciles.

Entre las actividades que causan contaminación puntual encontramos a:

- ✓ Lixiviados de vertederos de residuos urbanos y fugas de aguas residuales que se infiltran en el terreno.
- ✓ Lixiviados de vertederos industriales, derrubios de minas, depósitos de residuos radiactivos o tóxicos mal aislados, gasolineras con fugas en sus depósitos de combustible, etc.
- ✓ Pozos sépticos y acumulaciones de purines procedentes de las granjas.

Entre las actividades que causan contaminación difusa encontramos a:

- ✓ Uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura o en las prácticas forestales.
- ✓ Explotación excesiva de los acuíferos que facilita el que las aguas salinas invadan la zona de aguas dulces, por desplazamiento de la interfase entre los dos tipos de aguas.

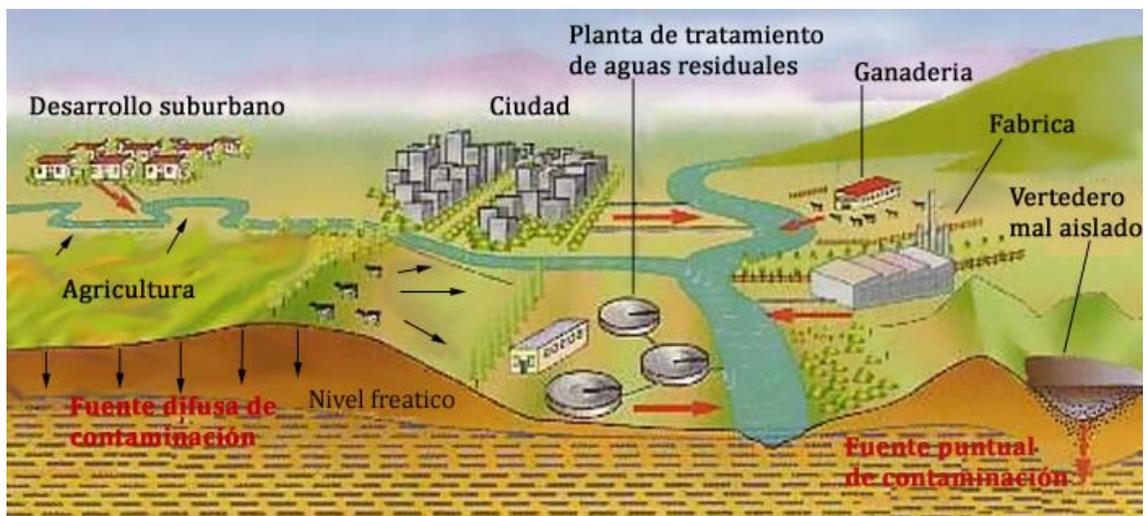


Figura 2.11 Fuentes difusas y puntuales de contaminación de las aguas subterráneas
Fuente: http://www.proyectosalohogar.com/Ciencias_ambientales/11CAgu/170AgSub.html

El tiempo con que se produce la contaminación obedece a varios factores, los cuales se describen a continuación:

a) Dilución

La importancia de este proceso viene ligada a la forma de producirse la contaminación; el agua contaminada es dispersada en el acuífero, lo cual supone un cierto grado de mezcla de los contaminantes con el agua, por lo que el ambiente físico y la estructura, mineralogía y características hidráulicas de los acuíferos juegan un papel muy importante en la resistencia a la contaminación.

b) Filtración mecánica

En materiales granulares finos pueden retenerse partículas en suspensión y microorganismos. En arenas gruesas, gravas o acuíferos fracturados, es casi inexistente. Además, la capacidad de cualquier filtro es limitada.

c) Precipitación

Pueden precipitar diversas sustancias según los cambios en el pH o el potencial redox del medio, al igual que la filtración, puede disminuir fuertemente la permeabilidad del medio.

d) Procesos de oxidación reducción

Los procesos de oxidación son muy importantes en la disminución de la contaminación por productos orgánicos y nitrogenados; se realiza predominantemente durante la infiltración en medio no saturado aunque también pueden producirse en el medio no saturado mientras no se consuma el oxígeno disuelto en el agua.

e) Adsorción y absorción por el terreno

Un terreno puede retener cantidades importantes de materiales contaminantes, en especial aquellos que consisten en moléculas complicadas y de gran tamaño. La

capacidad de retención tiene un límite, de modo que si el compuesto retenido no se descompone por otras acciones o se desintegra radiactivamente, el terreno no solo admite en unas determinadas circunstancias una cantidad máxima del mismo.

f) Desintegración o descomposición

Los elementos radiactivos y algunos productos químicos, como los pesticidas, desaparecen con el paso del tiempo, se habla de desintegración radiactiva o de descomposición, en el caso de los pesticidas. En ambos, el factor crucial es la vida media (tiempo en el que la concentración de la sustancia se reduce a la mitad). Esto será efectivo en elementos cuya vida media sea corta en relación con el tiempo de tránsito del agua en el acuífero. La vida media de algunos pesticidas es de unos pocos días, mientras que la de ciertos elementos radiactivos es de miles de años.

➤ **Contaminación de acuíferos por botaderos y ex botaderos de desechos sólidos**

El surgimiento de los botaderos fue el resultado de la necesidad humana de depositar en un sitio la basura producida por diferentes actividades antrópicas, inicialmente el problema no se consideraba tan grave porque las poblaciones eran mucho menores y por lo tanto el volumen de basura era mucho menor, por lo que el problema lo solucionaban ubicando los botaderos los más lejos posibles de las poblaciones; pero conforme las ciudades fueron creciendo, la población fue buscando otros lugares donde ubicarse, posteriormente parte de la población fue situándose cada vez más cerca de los botaderos, y con ello las poblaciones fueron tomando conciencia de que estos sitios estaban causando daños ambientales graves.

Hoy se sabe que la disposición inadecuada de desechos sólidos municipales en botaderos ocasiona impactos negativos en la salud humana y en el ambiente. Este tipo de contaminación es depositada en superficie, alcanza la superficie freática y los líquidos

procedentes de los propios residuos o el agua lluvia infiltrada a través de ellos, arrastran todo tipo de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Los factores que determinan la forma e intensidad del impacto están relacionados con el tipo predominante de residuo, distancia entre las zonas pobladas y los botaderos, profundidad de la napa freática, distancia y características de las fuentes de agua superficial que podrían verse afectados (CONAM, CEPIS/OPS, 2004).

La principal solución correctiva que debería de tomarse para la gestión de los residuos sólidos, es la creación de un Relleno Sanitario que cumpla con todas las normas técnicas necesarias; donde debe de haber un manejo integral de los residuos sólidos, desde su generación hasta su disposición final; y también la población debe tomar conciencia que es muy importante el reciclaje, para no desperdiciar productos que necesitan de un gran tiempo para su biodegradación.

Riesgos e impactos generados por botaderos y antiguos botaderos de residuos sólidos

Según la Guía Técnica para la Clausura y Conversión de Botaderos de Residuos Sólidos propuesta para Lima, Perú; nos dice que un mal tratamiento de los desechos sólidos puede provocar una serie de efectos negativos en el medio ambiente, entre los cuales podemos mencionar:

- Alteración de la calidad del suelo debido a su contaminación con agentes patógenos procedentes de laboratorios clínicos, hospitales, centros de salud y clínicas particulares, que pueden sobrevivir o reproducirse en suelos ricos en materia orgánica.
- Transmisión de diferentes tipos de zoonosis por artrópodos y roedores que viven en los botaderos.

- Transmisión de organismos patógenos de animales infectados al hombre, por contacto con el suelo, alimentos, agua y por la crianza de animales alimentados en estas condiciones.
- Contaminación del suelo por excretas de roedores, perros, cerdos y aves.
- Contaminación del suelo con sustancias químicas o subproductos tóxicos de la materia orgánica que no puede ser absorbida por el medio debido a la cantidad exagerada y concentrada de sustancia orgánica.
- Contaminación del suelo por el vertido inadecuado de residuos especiales (químicos y biocontaminados) y peligrosos (metales pesados y otro tipo de residuos de la industria formal e informal).
- Aumento de vectores de enfermedades, tales como moscas, cucarachas, zancudos y mosquitos, tanto en las zonas aledañas al botadero como en el mismo.
- Producción de olores desagradables y ruidos.
- Contaminación del agua subterránea por percolación de lixiviados.
- Obstrucción de los drenajes abiertos de aguas superficiales.
- Contaminación directa de los cuerpos de agua y modificación de los sistemas naturales de drenaje por el vertido incontrolado de residuos en ellos.
- Contaminación atmosférica por acción de los gases que se producen en la quema de los residuos de los botaderos.
- Proliferación de aves y riesgos de accidentes de aviación en zonas cercanas a aeropuertos.

- Riesgos a la salud de los trabajadores del botadero.

Las poblaciones expuestas a los agentes físicos, químicos y biológicos de los residuos sólidos municipales son los trabajadores formales e informales que manipulan residuos; la población no servida; la que vive cerca de los sitios de tratamiento y disposición de los residuos sólidos; la población de segregadores (personas que se dedican a la segregación de la basura) y sus familias; y la población en general, a través de la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, del consumo de carne de animales criados en basurales, y de la exposición a residuos peligrosos. Los principales factores que contribuyen a esta situación son la poca atención de las autoridades relacionadas con el sector y la deficiente calidad de servicios prestados (Acurio, 2007).

2.2. Vulnerabilidad de acuíferos

2.2.1. Definición de vulnerabilidad de acuíferos.

El concepto vulnerabilidad de acuíferos tiene diversas definiciones, calificaciones y metodologías para ser evaluada, dependiendo del autor del cual nos queramos auxiliar; además no todos los autores utilizan el término vulnerabilidad de acuíferos, algunos prefieren llamarlo vulnerabilidad de aguas subterráneas, o en vez de usar el término vulnerabilidad prefieren usar el término susceptibilidad, por lo que todos estos términos pueden llegar a ser considerados correctos. A continuación brindamos algunas definiciones de autores que han profundizado mucho en la temática de vulnerabilidad de acuíferos.

Vrba y Zaporzec (1994) *definen a la vulnerabilidad como una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y naturales.*

Foster e Hirata (1991) dicen que la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta.

Custodio (1995) señala que la vulnerabilidad a la polución expresa la incapacidad del sistema para absorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales.

Carbonell (1993) define la vulnerabilidad a la contaminación, como la tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por encima del acuífero más somero.

Balairón (2000) entiende por vulnerabilidad de un acuífero, la facilidad con la que un contaminante puede acceder al acuífero a través del suelo y de la zona no saturada.

Environmental Protection Agency (EPA) (1991) hace referencia a la vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida, como la facilidad con que un contaminante aplicado en la superficie, puede alcanzar al acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica.

National Research Council (1993) define vulnerabilidad de las aguas subterráneas como la tendencia o la probabilidad de que los contaminantes puedan llegar a una posición específica en el sistema de aguas subterráneas después de la introducción de contaminantes en algún lugar por encima del acuífero superior.

Zektser (2000) dice que el concepto de vulnerabilidad del agua subterránea se basa en el supuesto de que el medio ambiente geológico puede proporcionar un cierto grado de protección a las aguas subterráneas naturales de un impacto antropogénico, la contaminación de la atmósfera particularmente, el suelo y la escorrentía superficial.

Pettyjohn et al (1991) dice que la susceptibilidad del acuífero se relaciona con la posibilidad de contaminación, es decir, los acuíferos que tienen un alto grado de vulnerabilidad son los que están en zonas de alta densidad poblacional.

Auge (2004) considera a la vulnerabilidad como un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación.

También dentro del concepto de vulnerabilidad puede distinguirse lo siguiente (Balairón, 2000, p. 309):

- Vulnerabilidad intrínseca: Depende exclusivamente de las características hidrogeológicas del acuífero. Estas determinarán la mayor o menor accesibilidad del medio a la penetración de los contaminantes, así como la capacidad de atenuación del medio como resultado de la retención físico-química o de la reacción de los polucionantes con el terreno.
- Vulnerabilidad específica: Tendrá en cuenta factores de carácter externo, por ejemplo, de origen climatológico (pluviometría y temperatura.) y otros relativos a la carga contaminante: procedimiento y lugar de penetración del contaminante en el acuífero, movilidad y persistencia del contaminante en el terreno.

2.2.2. La vulnerabilidad en el manejo de recursos hídricos subterráneos

Cuando tenemos un recurso finito que puede llegar a ser afectado por diferentes razones, resulta necesario realizar una planificación de cómo se puede usar tal recurso y de qué forma se puede proteger éste también.

El agua es un vital recurso que se ve afectado por la demanda de la población para diversas actividades antropogénicas, a la vez que se ve afectado por ciertas actividades contaminantes que limitan el uso futuro del mismo.

La planificación hidrológica es la clave para lograr el éxito de la gestión del recurso hídrico, en cuanto determina la cantidad, calidad y disponibilidad del mismo; y prioriza aquellas intervenciones y estrategias que sean necesarias para satisfacer los requerimientos de la demanda en un contexto de sostenibilidad del recurso e interdependencia con el medio ambiente (Cerros, 2007, p. 37).

Es en este contexto que surge la denominada Gestión Integral del Manejo de los Recursos Hídricos, en nuestro caso priorizando las aguas subterráneas, sabemos que en el país es la mayor fuente de abastecimiento de agua potable a la población; también es conocido que los acuíferos tienen cierto nivel de autodepuración, dependiendo del tipo de roca que los resguarde. Es muy favorable la abundancia de arcillas y de materia orgánica, en cambio en los depósitos aluviales o las zonas kársticas la purificación del agua es mucho más difícil y estos tipos de acuíferos son mucho más sensibles a la contaminación; pero a pesar de la capacidad de purificarse es necesario tomar las medidas cautelarias para no tener que recurrir a procesos muy difíciles y de alto costo económico, por lo que cada vez existe mayor conciencia sobre la necesidad de desarrollar una gestión integral segura de las aguas subterráneas. Como resultado de esta situación, actualmente se generaliza el uso de técnicas para cartografiar la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación, como una herramienta de gran utilidad para compatibilizar la carga contaminante generada por actividades antrópicas.

El concepto de vulnerabilidad de acuíferos es útil para el planeamiento y toma de decisiones concernientes al manejo del recurso hídrico subterráneo y la protección del mismo. Algunas de las aplicaciones específicas se describen a continuación (Escobar, García, & Guerrero, 2002):

- El conocimiento de la vulnerabilidad de los acuíferos es clave en la formulación de políticas de gestión del agua subterránea y protección de la misma; así como en el desarrollo de normativa sobre vertidos y desechos sólidos.
- En la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) de proyectos y en los planes de manejo ambiental de distintas actividades humanas.
- En el Ordenamiento Territorial, definiendo áreas para el desarrollo de actividades específicas y restringiendo aquellas con alta vulnerabilidad.

2.2.3. Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad

2.2.3.1. Introducción

Existen diversos métodos a utilizar cuando se requiere evaluar la vulnerabilidad de aguas subterráneas, cada uno con sus ventajas y desventajas, con aplicaciones específicas en algunos casos, y con diversas variables que a veces hacen parecer difícil elegir qué método utilizar.

Los métodos para evaluar la vulnerabilidad los podemos clasificar en 3 grupos de acuerdo a la metodología adoptada, los cuales son (Cerros, 2007):

- **Ambientes Hidrogeológicos:** Evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos.
- **Modelos Analógicos:** Utilizan expresiones matemáticas para parámetros claves (tales como el tiempo de tránsito promedio en la zona no saturada) como un indicador del índice de vulnerabilidad.

- **Sistemas Paramétricos:** Utilizan parámetros convenientemente seleccionados para representar la vulnerabilidad, a los cuales les asignan distintos rangos e interacciones para generar un índice de vulnerabilidad absoluto o relativo

Por otra parte podemos evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas por medio de modelos de simulación, los que son muy difíciles de realizar en países en vías de desarrollo, debido a la gran cantidad de información necesaria. Sin embargo, este método es muy apropiado para analizar situaciones puntuales o con poca extensión espacial. Los métodos estadísticos o de monitoreo no permiten determinar la vulnerabilidad, sino que se utilizan para realizar estudios probabilísticas, que evalúen la posible dispersión del contaminante. Debido a lo anterior, resulta conveniente el uso de los métodos paramétricos, para los cuales existen experiencias a nivel tanto nacional como internacional que avalan su correcto funcionamiento.

A continuación se explicarán algunos de los métodos más conocidos para determinar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, profundizando en el método GOD y método DRASTIC.

2.2.3.2. Método GOD

Método elaborado para evaluar la vulnerabilidad de aguas subterráneas desarrollado por Foster en 1987; consiste en evaluar la vulnerabilidad multiplicando los siguientes tres parámetros (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002):

G = Ground water occurrence (Tipo de acuífero)

O = Overall aquifer class (Litología de la cobertura)

D = Depth (Profundidad del acuífero)

Cada uno de los parámetros tiene un valor de asignación dependiendo de sus características, el valor de vulnerabilidad es el resultado de la multiplicación de estos parámetros, podemos entenderlo mejor mediante la siguiente fórmula (Cerros, 2007):

$$V = G \times O \times D \quad (2.16)$$

Donde: V representa la vulnerabilidad.

Los valores resultantes de la ecuación anterior, son clasificados en intervalos que definen el grado de vulnerabilidad (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Valoración del índice GOD para la vulnerabilidad de un acuífero

Rango obtenido	Clasificación de vulnerabilidad del acuífero
0.0-0.1	Muy baja
0.1-0.3	Baja
0.3-0.5	Moderada
0.5-0.7	Alta
0.7-1.0	Extrema

Fuente: Gloria Cerros. Un enfoque de gestión ambiental del recurso hídrico desde la perspectiva de la vulnerabilidad de acuíferos. 2007. p: 68

El método tiene una estructura simple y pragmática y fue desarrollado específicamente para zonas cuya información acerca del subsuelo y sistemas de agua subterránea es escasa (Custodio, 1995). Las grandes simplificaciones introducidas por este método están justificadas por la disponibilidad real de datos, pero como contrapartida, se pierde definición y no es posible diferenciar un tipo de contaminante de otro. Así, el valor numérico obtenido significa una u otra cosa en función del contaminante que se considere y su interpretación queda en cierto grado, al criterio personal de quien lo interpreta (Custodio, 1995).

La estimación del índice de vulnerabilidad GOD involucra una serie de etapas concretas (Foster et al., 2002), siendo éstas las siguientes:

1. Identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0.0 a 1.0.
2. Especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del acuífero en términos de:
 - a. Grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia o ausencia de permeabilidad por fisuras).
 - b. Tipo de litología (considerando indirectamente porosidad efectiva, permeabilidad de la matriz y contenido de humedad en la zona no saturada o retención específica) y, asignar un índice a este parámetro en una escala de 0.4 a 1.0.
3. Estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad al techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0.6 a 1.0.

En la Figura 2.12 se presenta el esquema metodológico para evaluar la vulnerabilidad haciendo uso del método GOD.

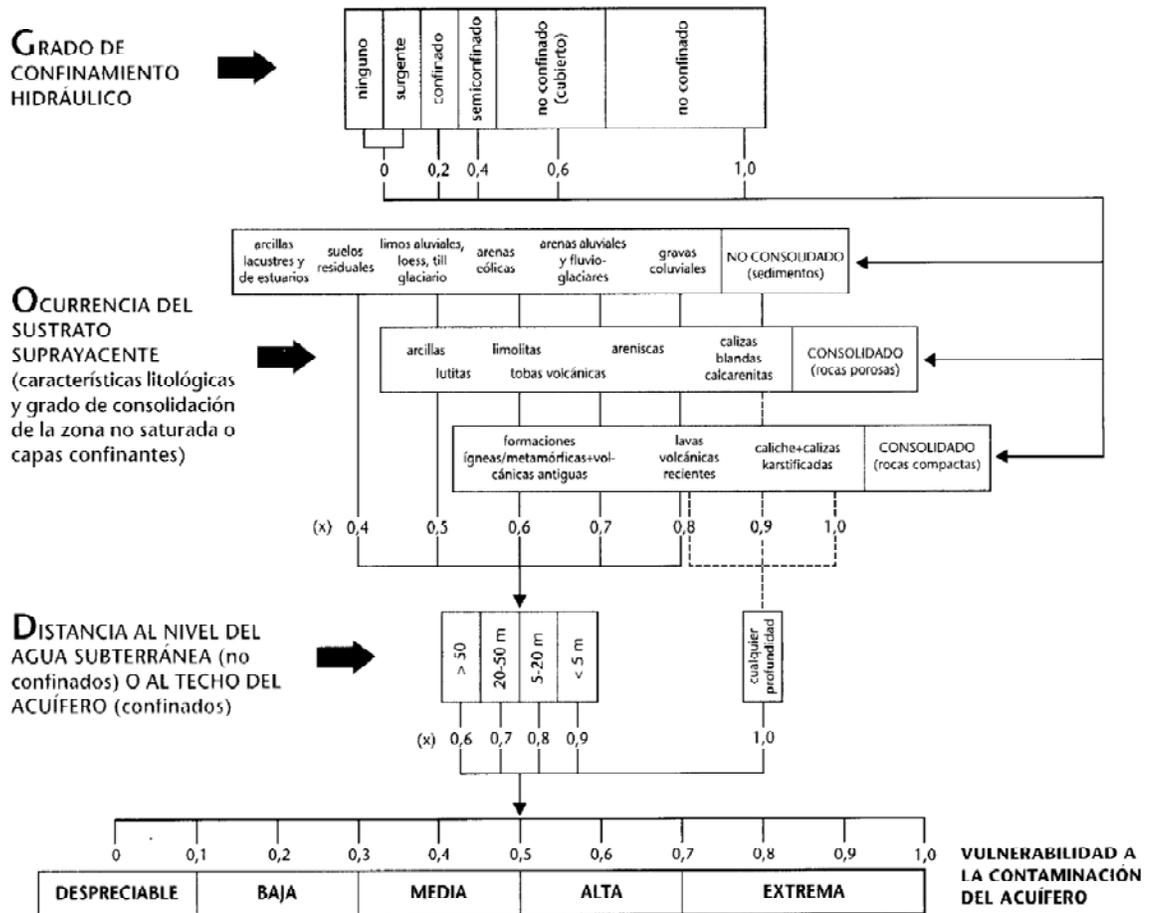


Figura 2.12 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

Fuente: Gloria Cerros. Un enfoque de gestión ambiental del recurso hídrico desde la perspectiva de la vulnerabilidad de acuíferos. 2007. p:69

Otros factores reconocidos como modificadores de la vulnerabilidad son tomados en cuenta por el método dentro de la carga contaminante. Entre estos se puede citar la infiltración efectiva y el tipo de suelo. Otra característica del método importante de destacar es que solo toma en cuenta la posible atenuación antes de alcanzar la zona saturada, sin tomar en cuenta la dilución y dispersión en el acuífero (Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica, 2009). Se debe notar también que cuando se presenta una secuencia de

depósitos diferentes se debe seleccionar la litología predominante o limitante para caracterizar al sustrato suprayacente (Alvarado, 2007).

A continuación se explicara por separado en qué consiste cada uno de los parámetros a determinar en la metodología GOD para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación.

Tipo de acuífero (G)

El tipo de acuífero se puede catalogar de la siguiente manera (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002):

- Ninguno
- Surgente
- Confinado
- Semiconfinado
- No confinado (cubierto)
- No confinado

Este parámetro está definido por el tipo de acuífero y el grado de confinamiento, y el índice varia de 0 a 1, (Alvarado, 2007).

Para determinar este parámetro se necesita información sobre inventario de pozos y el modelo de elevación digital (MED o DEM en su acrónimo en inglés), ya que es mediante la primera información que determinamos el tipo de acuífero que tenemos en la zona y el MED nos sirve para referenciar geográficamente los datos que encontremos.

Litología de la cobertura (O)

Este es igual que el parámetro I del método DRASTIC, y se refiere al tipo de litología de la zona no saturada del acuífero, y al grado de consolidación de los materiales que lo constituyen. Estos valores varían entre 0.4 y 1.0; y para la obtención de este parámetro es necesario contar con información hidrogeológica.

Profundidad del acuífero (D)

Para este índice se toma en cuenta la profundidad a la cual se encuentra el nivel del agua subterránea en los acuíferos no confinados y al techo de éste cuando es confinado, el índice varía de 0.6 a 1.0 (Alvarado, 2007).

Para la obtención de este parámetro se necesita información sobre inventario de pozos cercanos, hidrogeología de la zona y el MED.

2.2.3.3. Método DRASTIC

J.M. Vías et al (1999) manifiesta que este método fue desarrollado por Aller en 1987, es utilizado para cartografiar la vulnerabilidad a la contaminación en acuíferos, forma parte de los métodos nominados de sistemas paramétricos, se aplica independientemente del contaminante potencial y permite trabajar con unidades espaciales homogéneas. En este método se consideran 7 variables cuyas iniciales (en inglés) dan nombre al método:

D: Depth to water (Profundidad al nivel piezométrico)

R: Recharge (Recarga)

A: Aquifer media (Material acuífero)

S: Soil media (Tipo de suelo)

T: Topography (Topografía o pendiente)

I: Impact of the Vadose Zone Media (Impacto de la zona no saturada según su litología)

C: Hydraulic Conductivity of the aquifer (Conductividad Hidráulica)

A cada una de estas variables se les asigna un puntaje (los parámetros con subíndice R en la Ecuación 2.17 indican el puntaje en cada variable), índices de 1 a 10, los cuales reflejan su importancia en la vulnerabilidad; también se les asigna un peso o ponderación (los parámetros con subíndice W en la Ecuación 2.17 indican el peso o ponderación en cada variable), de acuerdo a la influencia respecto a la vulnerabilidad. Para el peso ponderado se emplea índices entre 1 y 5, adoptando generalmente el mayor de 5 para la profundidad del agua (D) y la litología de la sección subsaturada (I) y el menor de 1 para la topografía (T); posteriormente ambos índices se multiplican y luego se suman los 7 resultados, esto lo podemos visualizar de mejor manera en la siguiente ecuación:

$$V = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (2.17)$$

Donde: V representa la vulnerabilidad.

Al final obtenemos un valor o índice de vulnerabilidad, cuyos extremos son 23 (mínima) y 230 (máxima), aunque en la práctica encontramos valores que varían entre 50 y 200. (Auge, 2004). En la Tabla 2.3 se muestra la clasificación de la vulnerabilidad según el índice DRASTIC obtenido.

Tabla 2.3 Clasificación de la vulnerabilidad de acuíferos del método DRASTIC

Valor del índice	Vulnerabilidad DRASTIC
< 100	Despreciable
101-119	Muy baja
120-139	Baja
140-159	Moderada
160-179	Alta
180-199	Muy alta
> 200	Extrema

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002. p: 42

Foster & Skinner (1995) argumentan que el índice de vulnerabilidad obtenido a través del método DRASTIC, es el resultado de la interacción de varios parámetros, cuyas ponderaciones son cuestionables y en ciertos casos no independientes, pudiendo dar origen a situaciones en que parámetros relevantes, tales como la litología del suelo, quedan ocultos por otros parámetros menos importantes, tales como la movilidad del contaminante en la zona saturada.

Este método se recomienda sea aplicado en zonas de estudio superiores a los 42.7 Has, lo que permite una evaluación del sistema de flujo regional más que local; también se puede usar en sitios para disposición de desechos sólidos, porque permite evaluar la susceptibilidad de un sitio a la acción de una carga contaminante permanente; también para la evaluación de zonas de recarga y para creación de zonas de protección de acuíferos, porque permite discriminar áreas homogéneas con el mismo nivel de vulnerabilidad (Belmonte, 2000).

A continuación se explica en qué consiste las distintas variables del método DRASTIC, de qué forma se puede obtener información necesaria sobre ellas, y sobre los rangos y respectivos puntajes que se les pueden asignar a cada una de las variables.

Profundidad al nivel piezométrico (D)

Su espesor se obtiene como la diferencia entre el nivel topográfico y el nivel al que se encuentra el material saturado, que coincide con el piezométrico cuando el acuífero es libre o con el de techo del acuífero cuando es confinado. Este es el espesor que debe atravesar el contaminante para alcanzar la zona de saturación (Cerros, 2007).

La información a emplear en este parámetro debe estar en metros, y puede haber sido obtenida por medio de pozos perforados y excavados observados en visitas de campo a la zona en estudio, también mediante informes previos, donde puede ser necesaria una verificación (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002).

La medición de este parámetro puede dar resultados erróneos cuando el acuífero que se estudia es semiconfinado o confinado, ya que el nivel del agua medido no corresponde a la distancia desde el suelo hasta el acuífero; por lo que es mejor trabajar solo con información de pozos excavados (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002).

En la Tabla 2.4 se describe los puntajes a asignar dependiendo de la profundidad a la que se encuentre el nivel freático del acuífero.

Tabla 2.4 Puntajes de parámetro de Profundidad al nivel freático en método DRASTIC (Dr)

Rango de Profundidades (m)	Valor
<1.5	10
1.5-5.0	9
5.0-10.0	7
10.0-20.0	5
20.0-30.0	2
>30.0	1

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002. p: 43

Recarga (R)

La recarga es el volumen de agua por unidad de área que ingresa al acuífero durante un período de tiempo, para lo cual debe atravesar la superficie y la zona no saturada. En su camino el agua arrastra consigo muchas sustancias, siendo así el principal vehículo para la lixiviación y el transporte de contaminantes líquidos y sólidos (Cerros, 2007).

Dicho parámetro puede considerarse como el resultado de la precipitación menos la evapotranspiración menos la escorrentía superficial, y puede ser de mucha ayuda contar con estudios hidrogeológicos previos para determinar el presente índice (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002).

En la Tabla 2.5 se describe los puntajes a asignar dependiendo del rango del rango en que se encuentre los valores obtenidos de la recarga neta.

Tabla 2.5 Puntajes de Recarga Neta en método DRASTIC (Rr)

Rango (m/día)	Valor
0 – 0.00014	1
0.00014 - 0.00028	3
0.00028 – 0.00049	6
0.00049 – 0.00070	8
> 0.00070	9

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002. p: 43

Material acuífero(A)

DRASTIC valora la litología que constituye el acuífero, considerándose que ha mayor granulometría y fractura, mayor permeabilidad y por tanto un grado de vulnerabilidad más elevado. Su importancia radica por el grado de influencia en la atenuación de un contaminante, a través de los procesos de absorción, dispersión y dilución. Dicha influencia se mide por el recorrido de pluma o penacho de contaminación (Hernández, 2006).

Para obtener el presente parámetro podemos apoyarnos de pozos perforados o excavados, también por afloramientos de estratos en la ribera de los ríos; por lo que un buen estudio hidrogeológico puede resultar de mucha ayuda para determinar este parámetro.

En la Tabla 2.6 se presenta los puntajes a asignar dependiendo del tipo de la litología presente en el acuífero en estudio.

Tabla 2.6 Puntajes para Tipo de Acuífero en método DRASTIC (Ar)

Tipo de Acuífero	Rango	Valor Típico
Arcillas, limos, margas	1-3	2
Rocas ígneas, metamórficas	2-5	3
Rocas ígneas, metamórficas alteradas	3-5	4
Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	5-9	6
Areniscas masivas	4-9	6
Calizas masivas	4-9	6
Arenas, gravas y conglomerados	4-9	8
Volcánicas	2-10	9
Calizas carstificadas	9-10	10

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002. p: 43

Tipo de suelo(S)

El presente parámetro al igual que el medio acuífero, los materiales que conforman esta zona influyen en las propiedades del contaminante, atenuándolo, con lo que la vulnerabilidad a partir de este parámetro depende del tipo de materiales que se encuentran en ella (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002).

Para determinar dicho parámetro es necesario tener información sobre espesor, estructura, textura, mineralogía, propiedades físicas y químicas, porosidad, permeabilidad, humedad, capacidad de infiltración y compactación del material que constituye la zona en estudio (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002).

Toda la información expuesta anteriormente se puede ver reflejada en los mapas de suelos que son elaborados por cada país; o por inspecciones de campo en la zona en que se pretende hacer el estudio, dicha inspección es realizada observando los estratos vistos en los alrededores y también por medio de pozos perforados o excavados, también es complementada por inspecciones geofísicas.

En la Tabla 2.7 se describe los puntajes que se deben usar dependiendo del tipo de suelo que exista en la zona en estudio.

Tabla 2.7 Puntajes para Tipo de Suelo en método DRASTIC (Sr)

Tipo de Suelo	Valor
Arcilla no expansiva agregada	1
Suelo orgánico	2
Marga arcillosa	3
Marga limosa	4
Marga	5
Marga arenosa	6
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Turba	8
Arena	9
Grava	10
Delgada o ausente	10

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002. p: 43

Topografía o pendiente (T)

El agua que llega a la superficie del suelo, puede escurrir o infiltrarse. La influencia de la topografía consiste en que permite que un contaminante pueda infiltrarse a través de la zona no saturada (Cerros, 2007).

Para este parámetro es necesario conocer la elevación, pendientes variables de la superficie del terreno, trayecto de curso de aguas superficiales, densidad de corriente de la red. Toda esta información es obtenida por medio de la digitalización de mapas que contienen curvas de nivel de la zona en estudio (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002).

En la Tabla 2.8 se muestra los puntajes a usar dependiendo del rango en que se encuentre la pendiente en la zona en estudio.

Tabla 2.8 Puntajes para Topografía o Pendiente en método DRASTIC (Tr)

Rango de pendientes (%)	Valor
0 – 2	10
2 - 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002. p: 44

Impacto de la zona no saturada según su litología (I)

El tiempo que demora el agua en recorrer el camino hasta la zona saturada no sólo depende de la longitud, sino también del tipo de material con que se encuentra. Las características del espesor, composición litológica, propiedades químicas de las rocas determinan las condiciones de atenuación del material que se encuentra por debajo del horizonte del suelo y por encima de la capa freática. La biodegradación, la neutralización, la fricción, reacción química, volatización y dispersión son fenómenos que pueden ocurrir y contribuyen al proceso de atenuación en la zona vadosa (Hernández, 2006).

Para la obtención de este parámetro es necesario recurrir a la información de pozos perforados o excavados, y afloramientos observados en la zona que se estudia; estudios hidrogeológicos previos pueden darnos toda esta información o complementar los estudios de campo que se quieran realizar.

En la Tabla 2.9 se presenta los puntajes a asignar dependiendo de la litología presente en la zona no saturada del acuífero en estudio.

Tabla 2.9 Puntajes para parámetro Impacto de la Zona Vadosa en método DRASTIC (Ir)

Formación de la zona vadosa	Valor
Arcilla, limo. Marga	1
Esquistos, pizarras	3
Calizas	6
Areniscas	6
Alternancias: calizas, areniscas y arcillas	6
Arenas y gravas arcillosas	6
Rocas: ígneas metamórficas	4
Arenas, gravas	8
Volcánica	9
Calizas carstificadas	10

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002. p: 44

Conductividad Hidráulica (C)

La conductividad hidráulica se define como la mayor o menor facilidad con que el medio acuífero deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo, es decir que es la capacidad de transmisión de fluidos en la zona en estudio.

Este parámetro debe ser medido en metros sobre día, y la información es obtenida de informes de pozos perforados o excavados, además de complementarse de estudios hidrogeológicos previos (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002).

En la Tabla 2.10 se presenta los puntajes a usar dependiendo del rango en que se encuentre la conductividad hidraulica determinada en el acuífero en estudio.

Tabla 2.10 Puntajes utilizados para la Conductividad Hidráulica en método DRASTIC (Cr)

Conductividad (m/día)	Valor
0 - 4	1
4 - 12	2
12-28	4
28-41	6
41-82	8
> 82	10

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002. p: 45

2.2.3.4. Otros métodos

En Tabla 2.11 se da una descripción general sobre otros métodos que se pueden llegar a usar para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

Tabla 2.11 Resumen de métodos para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas

METODO	DESCRIPCION
SINTACS	<p>Auge (2006) nos explica que SINTACS es un método derivado de DRASTIC, desarrollado por Civita et al en 1990, para adecuarlo a las características hidrogeológicas de Italia, el acrónimo (en italiano) SINTACS comprende:</p> <p>S: Profundidad del agua I : Infiltración N: Sección subsaturada T: Tipo de suelo A: Características hidrogeológicas del acuífero C: Conductividad hidráulica S: pendiente topográfica</p>
AVI:	<p>Acrónimo de aquifer vulnerability index (índice de vulnerabilidad de acuífero), desarrollado por Van Stempvoort et al en 1992, para el mapeo de la vulnerabilidad del agua subterránea de la provincia de Prairie en Canadá. Cuantifica la vulnerabilidad a través de un parámetro llamado resistencia hidráulica (C) función del espesor de la zona subsaturada (d) y la permeabilidad vertical de los componentes de la misma (k). En la siguiente fórmula podemos visualizar lo dicho anteriormente: [Auge, 2006]</p> $C = \sum_{i=estratos} \frac{d_i}{k_i} \quad (2.18)$
EKv	<p>Es un método creado para ser usado en acuíferos libres, y cuyos parámetros a determinar son la profundidad de la superficie freática (E) y la permeabilidad vertical en la zona subsaturada (Kv), parámetros que también son considerados en el método AVI; se les asigna índices que van de 1 a 5, posteriormente ambos valores se suman y nos brindan un índice final, con extremos de 2 y 10, lo escrito lo podemos visualizar en la siguiente fórmula: [Auge, 2006]</p> $EK_v = E + K_v \quad (2.19)$
EPIK	<p>Método paramétrico desarrollado por Doerfliger y Zwahlen en 1997, para ser usado específicamente en acuíferos kársticos, el acrónimo significa: Zona de fisuras y grietas en terreno kárstico (Epikarst, E), Cubierta de protección (Protective cover, P), Condiciones de infiltración (Infiltracion conditions, I), Desarrollo de la red kársticas (Karst network development, K); el método incluye 4 factores de ponderación (α, β, γ y δ), aplicables a cada parámetro, y para valorar su peso relativo en el cálculo del índice de vulnerabilidad intrínseca, podemos representarlo en la siguiente fórmula: [Auge, 2004]</p> $VULNERABILIDAD_i = (\alpha.Ei) + (\beta.Pi) + (\gamma.Ii) + (\delta.Ki) \quad (2.20)$
$\Delta hT'$	<p>Auge (2004), nos explica que este método fue desarrollado para acuíferos semiconfinados, la vulnerabilidad de estos esta controlada por propiedades físicas y geométricas del acuitardo que conforma su techo y también por la diferencia de potencial hidráulico que guarda con el libre sobrepuesto; donde las variables a determinar serán: Δh: diferencia de potencial hidráulico, T': transmisividad vertical del acuífero. Considerando las dos variables mencionadas (Δh y T') se establecen tres grados de vulnerabilidad, determinados en primer lugar por el gradiente vertical de potenciales hidráulicos y secundariamente por la transmisividad del acuitardo</p>

Continuación Tabla 2.11...

GODE	Auge et al (2004) desarrolla una modificación al método GOD, para usarlo en acuíferos confinados o semiconfinados; la diferencia entre GODE y GOD es que además de incluir los parámetros tipo de acuífero (G), litología de la cobertura (O), profundidad del acuífero (D); el primero agrega una nueva variable a determinar, la cual es el espesor de la zona saturada correspondiente al acuífero libre sobrepuesto y el espesor del acuitardo (E).
GODS	Desarrollado por Foster et al, en 1996, el presente método utiliza los mismos parámetros que el índice GOD que son tipo de acuífero (G), litología de la cobertura (O), profundidad del acuífero (D), surge debido al consenso de algunos investigadores en que al método GOD le faltaba incluir el efecto que tiene el suelo (S), y se representa mediante la siguiente fórmula: [Ríos y Vélez, 2008] $VULNERABILIDAD_{GODS} = G * O * D * S \quad (2.21)$
PATHS	Método creado por Valcarce y Rodríguez en 2004, cuyo índice se obtiene a partir del análisis de factores como la Precipitación (Pp), profundidad del nivel freático (P), litología del acuífero (A), tectónica (T), pendiente topográfica (PT) y la resistencia hidráulica del suelo (HS). Cada uno de los parámetros es ponderado por un factor W, según su importancia. La valoración del índice se hace según la siguiente ecuación: [Ríos y Vélez, 2008] $VULNERABILIDAD_{PATHS} = WP + WPp + WA + WT + WPT + WHS \quad (2.22)$
BGR	Creado por Hölting et al en 1995, el método estima la protección de los materiales de la zona no saturada al acuífero, los parámetros que son necesarios determinar en la evaluación de la protección (P _T) son: la capacidad de campo efectiva del suelo (S), recarga natural del acuífero (W), litología (R), espesor de cada una de las capas de la zona no saturada (T), presencia de acuíferos colgados (Q), condiciones de presión (H _P). A cada uno de estos parámetros se les asocia un puntaje, los cuales ponderados y sumados entre si, dan como resultado un valor que se traduce en vulnerabilidad [Ríos y Vélez, 2008] $P_T = W * S + W \left(\sum_{i=1}^N R_S * T_i \right) + Q + H_P \quad (2.23)$

2.2.4. Técnicas y herramientas utilizadas en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas por los métodos GOD y DRASTIC

Son muchas las técnicas y herramientas utilizadas para recopilar la información necesaria para la creación de mapas de vulnerabilidad, la información que se necesita para los métodos GOD y DRASTIC en general es:

- ✓ Información de pozos

✓ Modelo de elevación digital (MED)

✓ Hidrogeología

✓ Información de suelos

Toda esta información la podemos encontrar mediante perforación de pozos, curvas de nivel de la zona en estudio, estudios hidrogeológicos previos, información sobre el suelo, mapas etc. A continuación se describen las técnicas y herramientas utilizadas para determinar la información expuesta anteriormente.

Perforación de pozos

El método más seguro para conocer las características de las formaciones que yacen por debajo de la superficie terrestre del terreno, es el de perforar a través de éstas, obteniendo de este modo muestras geológicas mientras se perfora y llevando un registro litológico del agujero (Johnson División OUP Inc, 1975).

Lo ideal sería que al perforar se recogiera muestras representativas a profundidades determinadas y a intervalos tales, que se pudiera mostrar el carácter litológico completo de la formación que se ha penetrado. El método de recuperación de núcleos que se puede emplear cuando se está perforando dentro de rocas consolidadas, es el que más se aproxima a esa condición ideal, le siguen los métodos de embutir núcleos que se aplican cuando se perfora en materiales suaves o no consolidados (Johnson División OUP Inc, 1975, p. 180).

Las muestras que usualmente se obtienen por otros sistemas, son los cortes que resultan de la acción del barreno, aunque no son completamente representativas de la formación que se ha penetrado, y por lo general bastante confiables en las exploraciones de aguas subterráneas (Johnson División OUP Inc, 1975, p. 180).

El método convencional de rotación resulta a menudo más rápido y más económico cuando se perfora en formaciones no consolidadas, que no contienen guijarros o cantos rodados. La ventaja del método de rotación crece conforme se perfora más profundamente en tales materiales. Una de las desventajas más generalizadas en el método de rotación, es la que en un agujero de prueba perforado por el método, el nivel estático del agua por lo general no se puede medir a menos que se instale un ademe y extraiga gran parte del lodo de perforación (Johnson División OUP Inc, 1975, p. 181).

Cuando la profundidad es moderada, se prefiere por lo general el sistema de percusión; igualmente cuando se está perforando en calizas cavernosas, basaltos o en toba dura. El muestreo de materiales no consolidados por el sistema de percusión, ofrece dificultades comparativamente pequeñas (Johnson División OUP Inc, 1975, p. 181).

En los últimos años, se ha utilizado el método combinado de percusión y rotación, con herramientas impulsadas por aire comprimido, que logra penetrar rápidamente en las formaciones consolidadas, este método funciona bien en diámetros de hasta 15 cm (Johnson División OUP Inc, 1975).

Pozos de observación

Se entenderá pozo de observación, a un pozo de explotación o experimental, en el que se puede medir el nivel del agua. Esta medición se hará por medio de un piezómetro que es un tubo de pequeño diámetro conectado hidráulicamente al acuífero y en cuyo interior el agua alcanza una altura que equilibra la presión del acuífero en el punto de conexión (Custodio & Llamas, 2001).

Estos pozos nos pueden dar información sobre:

- a) Espesor total o parcial del o de los acuíferos y sus oscilaciones de nivel

- b) El valor aproximado de su permeabilidad o transmisividad y de su coeficiente de almacenamiento
- c) Obtener muestras de agua

Inventario de pozos

Este término denominando también inventario de puntos de agua o simplemente inventario, es quizás el sistema más idóneo para empezar a conocer rápidamente las características hidrogeológicas de una zona dada sin tener la necesidad de recurrir a reconocimiento directo (pozos, sondeos, piezómetros) cuyo coste es más elevado y exige además un tiempo de realización material que con mucha frecuencia es bastante grande. Esta información se obtiene a partir de obras ya construidas, en estas caen todas las perforaciones existentes, ya sean o no explotadas, abandonadas o incluso destruidas; y es mediante éstos que se puede conocer el perfil litológico de una perforación, posición del nivel piezométrico, características químicas del agua extraída, volúmenes de agua utilizada por unidad de tiempo, evolución temporal de cualquiera de los datos expuestos antes.

Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos no miden directamente el tipo de roca, ni su porosidad, ni la permeabilidad o densidad de la formación, estos métodos evalúan otras propiedades de los materiales que constituyen el acuífero (Johnson División OUP Inc, 1975). Existe una gran diversidad de métodos de este tipo, pero los que se usan de forma más usualmente cuando se habla de aguas subterráneas son los método eléctrico resistivo y método de refracción sísmica.

Dentro de los métodos eléctricos el que más utiliza es el método eléctrico resistivo y la característica física utilizada es la resistividad o resistencia específica de los diferentes

terrenos. Si en un terreno introducimos una corriente eléctrica, ésta se propaga de forma tal que podemos asignar al terreno una resistencia, una capacidad y una inductancia. Si la corriente eléctrica es continua tendremos la resistencia como único parámetro (Custodio & Llamas, 2001).

El 70% de los estudios de geofísica realizados para estudios hidrogeológicos utilizaron los métodos eléctricos; este método permite suministrar una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo y se puede determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad. El método de resistividades permite no sólo el estudio de formaciones subhorizontales, sino también la determinación de formaciones subverticales (fallas, filones, zonas de contacto, etc.).

Los instrumentos portátiles sismográficos utilizan golpes sobre la superficie del terreno, para producir las ondas de choque. El ensayo se efectúa colocando el detector en contacto con el terreno, conectando un cable eléctrico con el contador de tiempo y dando golpes con un mazo a varias distancias del detector. Se comienza en un punto a 3 m del detector y se prosigue con los puntos siguientes de impacto, a intervalos de 3 m (Johnson División OUP Inc, 1975, p.201).

El uso más frecuente del método sísmico es el reconocimiento de canales enterrados en la roca. En las áreas de glaciación, estos canales enterrados contienen a menudo depósitos de arena y grava que constituyen excelentes acuíferos (Johnson División OUP Inc, 1975).

Estudios hidrogeológicos.

Conducen a una cuantificación más aproximada de los embalses subterráneos localizado en los estudios de reconocimiento o preliminares. La escala de los mapas suele oscilar entre 1:100000 y 1:50000; estos mapas están complementados por mapas como litológicos, de isopiezas, mapas isotransmisibilidades, de oscilaciones de niveles

piezométricos, de isopacas de los acuíferos, de profundidad de la zona saturada, de concentraciones iónicas, etc. (Custodio & Llamas, 2001).

Los mapas hidrogeológicos constituyen una representación grafica de una serie de fenómenos o características de las aguas subterráneos o bien sucesos que por lo tanto deben ir perfectamente situados en el tiempo.

Mapas topográficos

Los mapas topográficos nos permiten determinar las curvas de nivel de la zona en estudio, es por medio de esta y la interpolación en un SIG que se logra determinar el MED. La topografía ilustra la distribución de zonas montañosas y llanuras. Permite apreciar la extensión de las distintas cuencas de recepción de cada uno de los cursos de aguas superficiales que existen en la misma, la distribución de las pendientes del terreno etc.

Mapas geológicos

Los mapas topográficos, mapas geológicos y las fotografías aéreas; constituyen una de los instrumentos básicos para el estudio de las aguas subterráneas. Esta fuente de información es de la mas básica y es por medio de esta que se puede determinar la localización y movimiento de las aguas subterráneas (Custodio & Llamas, 2001).

Es a través de la cartografía geológica de la superficie en estudio que se registra la naturaleza litológica o estratigráfica las características estructurales de los afloramientos de las rocas, es por medio de los perfiles geológicos y los diagramas tridimensionales que se puede adquirir una visión adecuada de la geometría de los acuíferos. Por lo general, es útil que la escala vertical de los perfiles sea varias veces superior a la escala horizontal (Custodio & Llamas, 2001).

Las fotografías aéreas constituyen un excelente instrumento para la cartografía geológica pues, pone en relieve aspectos difíciles de ver sobre el propio terreno (Custodio & Llamas, 2001).

Mapas de suelos

Un mapa no es la realidad del terreno, sino una representación del conocimiento estructurado sobre la distribución de los suelos en el paisaje. Se trata de una aproximación a la realidad del terreno, aproximación que será tanto más precisa, cuanto más alta haya sido la densidad de observaciones y más detallada sea cual sea la escala. La información suministrada por un mapa de suelos sirve, entre otras cosas, para:

- Determinar la capacidad de uso de las tierras y orientar alternativas de uso bajo ciertos niveles de manejo.
- Dar bases técnicas para encarar líneas de investigación y experimentación agropecuaria.
- Planificar el uso racional del suelo adecuando las prácticas de manejo y conservación a las exigencias de las distintas clases de tierra para lograr una mayor y sostenida productividad.
- Establecer áreas de recuperación y habilitación de tierras afectadas por erosión, salinidad, alcalinidad, inundación, etc.
- Establecer con criterio técnico las áreas de conservación de suelos, políticas crediticias, de colonización, etc.

Estudios climatológicos

Dentro de estos estudios podemos mencionar la determinación de la precipitación y evapotranspiración; la precipitación y la evapotranspiración son los factores cuantitativamente más importantes en el balance hidráulico de una región cualquiera, ya que no es lo mismo estudiar una región con una precipitación media anual de 200 mm que una con 1500 mm; ni una zona circumpolar, en la que además de estar los suelos helados, la evapotranspiración es mínima (Custodio & Llamas, 2001).

Pruebas de infiltración

La velocidad de infiltración del agua a través de los diferentes estratos en el suelo y la zona no saturada, puede determinarse a través de pruebas de infiltración. Estas consisten en excavar a través de los diferentes estratos, verter agua en el mismo y tomar el tiempo en que el agua penetra en la misma (Cerros, 2007).

Visitas de campo

Las visitas de campo son importantes para la verificación de datos obtenidos existentes y generar un criterio propio sobre la problemática encontrada; en esta se puede delimitar la zona de estudio mediante la ubicación de coordenadas geográficas que delimiten el perímetro de donde se realizara la investigación.

Comprenden la determinación de la estratigrafía del suelo, mediante la inspección de afloramientos de roca, que permitan medir el espesor de los materiales presentes en las capas superiores del suelo, así como franjas de la zona no saturada que sean visibles (Cerros, 2007).

2.2.5. Uso de los mapas de vulnerabilidad

Como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles de sensibilidad permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran un área (Bessouat et al., 2001). Debemos tener claro que para realizar la cartografía de la zona en estudio se deben simplificar los métodos, no es lo mismo asimilar el concepto de vulnerabilidad que llevarlo a la práctica; y también los métodos cartográficos de la vulnerabilidad resultan más eficaces cuando se cubre una gran área, analizando un número relativamente grande de actividades potencialmente contaminantes y un reducido nivel de información, o también en áreas donde la complejidad geológica resulta muy alta (Hirata & Rebouças, 2001).

Entre los años 1960 – 1970, se desarrolló la construcción de los mapas de vulnerabilidad en diferentes países de Europa, fundamentalmente en Francia, Checoslovaquia y Alemania. En los Estados Unidos, Walker construyó un mapa de contaminación potencial de acuíferos en el estado de Illinois, (Walker, 1969), el cual es considerado el primer mapa de vulnerabilidad producido en ese país.

Para realizar estos mapas se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG), que es una herramienta diseñada para consultar, manipular y aplicar los datos de: información geográfica, cartografía digital, bases de datos de atributos y estadísticas, de una manera simultánea y automatizada (López y Granados, 2000).

Los mapas de vulnerabilidad deben ser vistos como una de las herramientas principales para el manejo del medio ambiente y pueden ser usados con tres propósitos fundamentales (Baez, 2001):

- a. En procesos de toma de decisión concerniente a la protección y manejo de los recursos hídricos subterráneos,
- b. Para identificar áreas susceptibles a la contaminación y decidir sobre las investigaciones y redes de monitoreo necesarias, y
- c. En planes informativos y educativos sobre la necesidad de proteger los acuíferos y evitar la contaminación del agua subterránea, insistiendo en que los acuíferos forman parte de un sistema ecológico interconectado que está siendo afectado por la actividad humana.

En general hay que tomar en cuenta que los mapas de vulnerabilidad se ven limitados por la falta de datos representativos debido a malas técnicas de recopilación de datos, descripción inadecuada del sistema, o por falta de metodología generalizada; es por ello que es conveniente no usar demasiados datos para evitar una mala interpretación (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002).

Según Vrba y Zaporozec (1994), las tendencias futuras en la producción y uso de los mapas de vulnerabilidad son las siguientes:

- a. Perfeccionamiento de los métodos para evaluar la vulnerabilidad y unificación de los símbolos empleados en estos mapas.
- b. Definir las clases de vulnerabilidad con mayor precisión cuantitativa sobre la base del incremento del conocimiento del transporte de contaminantes.
- c. Incrementar el conocimiento de los procesos que tienen lugar en la zona no saturada, lo que permitirá perfeccionar la modelación de los sistemas acuíferos.
- d. Mayor desarrollo de los mapas de vulnerabilidad específica a contaminantes individuales o grupos de contaminantes.

- e. Incremento de la producción de mapas de vulnerabilidad a escalas 1:10000 a 1:25000.
- f. Desarrollo de mapas asistidos por computadoras utilizando SIG.
- g. La integración de los mapas de vulnerabilidad como un elemento indispensable para la planificación y toma de decisiones a nivel local y regional.

2.3. *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*

2.3.1. Introducción a los SIG

Los Sistemas de Información Geográfica permiten el manejo confiable de una gran cantidad de datos y la elaboración de escenarios dinámicos, en el plano o en el espacio en tiempo real. A través de estos sistemas los mapas para evaluación de vulnerabilidad, los cuales implican la superposición de diversos factores que influyen en el fenómeno, pueden ser regularmente actualizados en un tiempo relativamente corto (Escobar, Garcia, & Guerrero, 2002, p. 48).

Martínez et al (1999) define los SIG como una colección de hardware, software, datos geográficos y personal integrado para la captura eficiente, almacenamiento, actualización, manipulación y análisis de información geográfica (Figura 2.13).

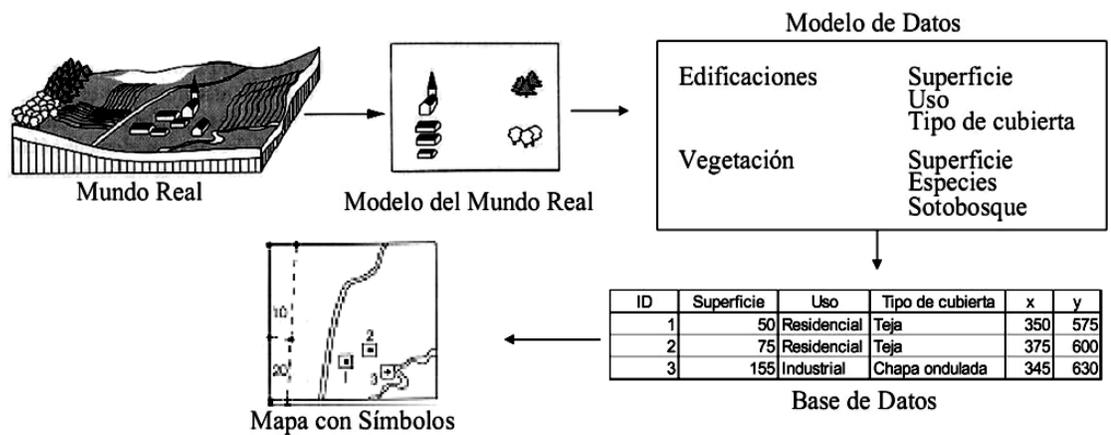


Figura 2.13 Definición gráfica de Sistemas de Información Geográfica

Fuente: Curso de Sistemas de Información Geográfica con aplicaciones al Manejo de Recursos Naturales

El Sistema de Información Geográfica de Canadá fue el primer SIG en el mundo similar a tal y como lo conocemos hoy en día, tenía un considerable avance con respecto a las aplicaciones cartográficas existentes hasta entonces, puesto que permitía superponer capas de información, realizar mediciones y llevar a cabo digitalizaciones y escaneos de datos. Asimismo, soportaba un sistema nacional de coordenadas que abarcaba todo el continente, una codificación de líneas en "arcos" que poseían una verdadera topología integrada y que almacenaba los atributos de cada elemento y la información sobre su localización en archivos separados. Como consecuencia de esto, Tomlinson está considerado como "el padre de los SIG", en particular por el empleo de información geográfica convergente estructurada en capas, lo que facilita su análisis espacial. El CGIS (Sistema de Información Geográfica de Canadá) estuvo operativo hasta la década de los 90's, llegando a ser la base de datos sobre recursos del territorio más grande de Canadá. Fue desarrollado como un sistema basado en una computadora central y su fortaleza radicaba en que permitía realizar análisis complejos de conjuntos de datos que abarcaban todo el continente. El software, decano de los Sistemas de Información Geográfica, nunca estuvo disponible de forma comercial.

Los tipos de operaciones que realiza un SIG son:

- ✓ Generación de capas de información por interpolación espacial.

- ✓ Manipulación de mapas con operaciones algebraicas (por ejemplo: sumas, multiplicaciones, restas, y división entre mapas).
- ✓ Operaciones de geoprocésamiento.
- ✓ Búsquedas espaciales u operadores de distancia.
- ✓ Análisis de modelos de elevación del terreno.
- ✓ Generación de mapas de toma de decisiones y de análisis de riesgos.
- ✓ Procesamiento, despliegue y análisis de imágenes de satélites.
- ✓ Geo-referenciación y transformaciones de sistemas de coordenadas.

Los elementos geográficos básicos usados por los SIG se describen en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Elementos geográficos básicos usados por los SIG.

Elemento	Descripción
Polígono	Es un área cerrada formada por una o más líneas (ejemplo: parcelas, tipos de suelo, límites administrativos, etc.)
Línea	Es una característica definida por la conexión de una serie de coordenadas o por una descripción geométrica (ejemplos: arroyos, calles, conducción de agua, conducciones de gas, etc.)
Punto	Una característica definida por una simple coordenada (ejemplos: postes de luz, pozos, monumentos)
Nodos	Característica localizada en la intersección de dos líneas (ejemplos: intersecciones de calles, uniones de tuberías)
Anotaciones	Texto colocado en un mapa como descripción gráfica (ejemplos: nombres de calles, y parcelas o índices numéricos)

➤ Modelos de representación de los SIG

Al manipular información de un SIG debemos conocer que existen dos formas de representar la información con que contamos, estas son raster y vectorial (Figura 2.14).

SIG Raster

Los SIG raster se centran en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Dividen el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Los datos raster se componen de filas y columnas de celdas, cada celda almacena un valor único, los datos raster pueden ser imágenes (imágenes raster), con un valor de color en cada celda (o píxel). Otros valores registrados para cada celda pueden ser un valor discreto, como el uso del suelo, valores continuos, como temperaturas, o un valor nulo si no se dispone de datos.

Características de los sistemas Raster:

- ✓ Utilizan celdas a las cuales se les asigna el valor del atributo (otros nombres: sistema cuadrícula o matricial).
- ✓ Requiere mucha memoria de computador.
- ✓ La información es fácilmente analizada.
- ✓ Software posee muchas posibilidades de manipulación y es barato.
- ✓ Al dar la localización geográfica a un píxel, se da automáticamente la localización a todos los píxeles en la imagen.
- ✓ Fotos e imágenes en sensores remotos, son raster.
- ✓ Permite rápidas combinaciones de capas (la superposición de raster se acompaña de operaciones algebraicas).

- ✓ Más favorable para el análisis de datos continuos o la interacción de datos discretos y superficies continuas (distancia ponderada, modelos).

SIG Vectorial

En los SIG vectoriales el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir; de límites definidos. Cada una de estas geometrías está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos.

Características de los sistemas Vector:

- ✓ Los datos son más difíciles de manipular y analizar.
- ✓ El software es más costoso.
- ✓ No requiere tanto espacio de memoria.
- ✓ Cada punto requiere georeferenciación.
- ✓ Produce representaciones gráficas muy precisas de mapas de características.
- ✓ Mantiene características discretas para puntos, líneas, polígonos, nodos y anotaciones.
- ✓ Permite la combinación de las capas de datos.
- ✓ Utiliza coordenadas x, y para definir puntos, los puntos forman líneas y las líneas cerradas, polígonos.

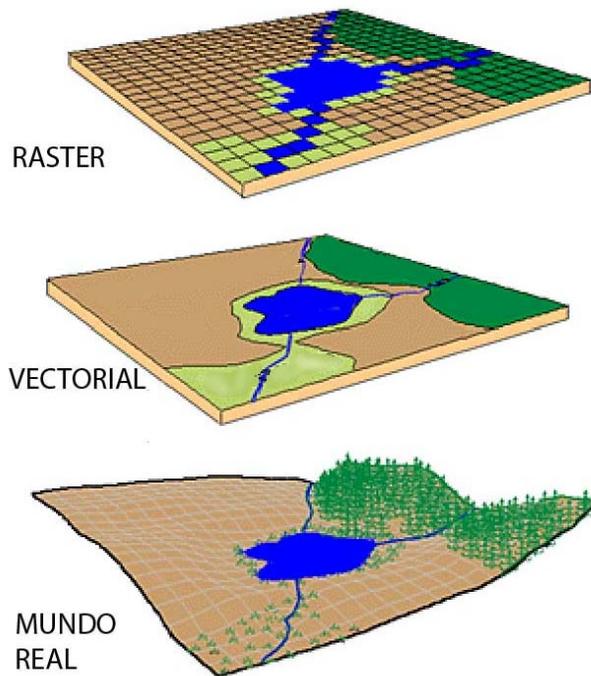


Figura 2.14 Tipos de representación de la información en los SIG
Fuente: <http://www.geotecnologias.com/Documentos/GIS.pdf>

➤ **Programas SIG**

Existen diversos tipos de programas, que tienen diferentes características en cuanto al costo, los sistemas operativos en que funcionan, aplicaciones especializadas, etc. En la Tabla 2.13 se hacen una síntesis de algunos de los programas más utilizados con algunas de sus características principales.

Tabla 2.13 Características de algunos programas SIG

Nombre	Fecha de creación	Sistemas operativos	Modelo de datos usado	Licencia de programa	Descripción
ERDAS	1978	Windows	Raster	Programa no libre	Programa que trabaja junto a ESRI (Environmental Systems Research Institute); este programa organiza, visualiza, manipula, mide e integra cualquier tipo de imágenes geográficas e información geoespacial en ambientes de 2D y 3D.
ILWIS	1985	Windows	Raster Vectorial	Libre	Distribuido por ITC Enschede (International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation) Permite entrar, manipular, analizar y presentar datos geográficos (mapas). A partir de estos se puede generar información espacial, modelos espaciales y evaluar diferentes procesos de la superficie de la tierra. Es un software libre a partir de su versión 3.4.
ArcGis	1999	Windows	Raster Vectorial	Programa no libre	Desarrollado por ESRI, este programa permite administrar, organizar, crear y previsualizar tanto datos geográficos como alfanuméricos; trabaja en ambiente 2D y 3D. Se distribuye comercialmente bajo tres niveles de licencias que son, en orden creciente de funcionalidades (y coste): ArcView, ArcEditor y ArcInfo.
GRASS GIS	1982	Linux	Raster Vectorial	Libre	Programa basado en 350 módulos y herramientas que ejecutan tareas concretas, puede visualizar y manipular datos vectoriales y también raster.
Micro Station	1985	Windows	Raster Vectorial	Programa no libre	Desarrollado por Bentley Systems, combina potencia de diseño para el Diseño Asistido por computador (CAD) 2D y 3D profesional.

Continuación Tabla 2.13...

Nombre	Fecha de creación	Sistemas operativos	Modelo de datos usado	Licencia de programa	Descripción
Surfer	1983	Windows	Raster Vectorial	Programa no libre	Desarrollado por Golden Software, este programa permite digitalizar, organizar, visualizar y manipular información geoespacial en ambiente 2D y 3D

2.3.2. Aplicación de los SIG en el manejo de los recursos hídricos subterráneos

Considerando que toda injerencia antrópica sobre los sistemas naturales al transformarlos en valores económicos, cambia su potencial ecológico dejando un impacto negativo sobre el ambiente, se convierte necesaria la planificación en el ordenamiento territorial y en el mantenimiento de los recursos naturales. Este desconocimiento atenta contra la conservación del medio natural y en particular la gestión de estos recursos hídricos (Duarte et al, 2005).

Un SIG es un conjunto informatizado de datos, que representa la realidad posibilitando la modelización de eventos a futuro, es decir; un conjunto de datos referenciados a puntos territoriales o espaciales que permiten la obtención de información indispensable para todo tipo de planificación y evaluación de gestión (Duarte et al, 2005).

El papel de los SIG en la gestión del manejo del recurso hídrico subterráneo es como instrumento, esto se refiere a las herramientas de gestión como la evaluación y la información. Incluye además las competencias y destrezas de las instituciones (Cerros, 2007).

Los SIG en la gestión de recursos hídricos nos permite elaborar mapas de vulnerabilidad, evaluar riesgo, realizar diagnósticos de determinadas zonas previo a la formulación de políticas locales tendientes al desarrollo sustentable.

El SIG en la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos, es el medio que nos permite organizar toda la información solicitada por los diversos métodos para determinar la vulnerabilidad, y posteriormente procesarla para que mediante mapas de vulnerabilidad se pueda tener una herramienta para planificar y proteger el recurso hídrico.

2.3.3. Uso del ILWIS para la elaboración de mapas de vulnerabilidad de acuíferos

ILWIS es un acrónimo que significa Sistema de Información Integrado de Tierras y Aguas (por sus siglas en ingles Integrated Land and Water Information System). Es un programa que tiene la capacidad para hacer procesamiento digital de imágenes. ILWIS ha sido desarrollado por el Instituto Internacional de Estudios Aerospaciales y Ciencias de la Tierra (ITC) de Enschede, Holanda (Países Bajos). Como todo paquete de SIG, ILWIS permite entrar, manipular, analizar y presentar datos geográficos. A partir de estos datos se puede generar información espacial, modelos espaciales y evaluar diferentes procesos de la superficie de la tierra.

En ILWIS se manejan dos tipos de datos, éstos son (Escobar, García, & Guerrero, 2002):

1. Datos espaciales: Son aquellos que representa una ubicación geográfica de objetos. Los mapas son considerados datos espaciales que responden a la pregunta ¿Dónde está?.
2. Datos de atributo: Representan atributos y propiedades de objetos.

En Figura 2.15 se muestra el ambiente ILWIS, además de mostrar de forma general todas las herramientas que se pueden usar al conocer ILWIS.

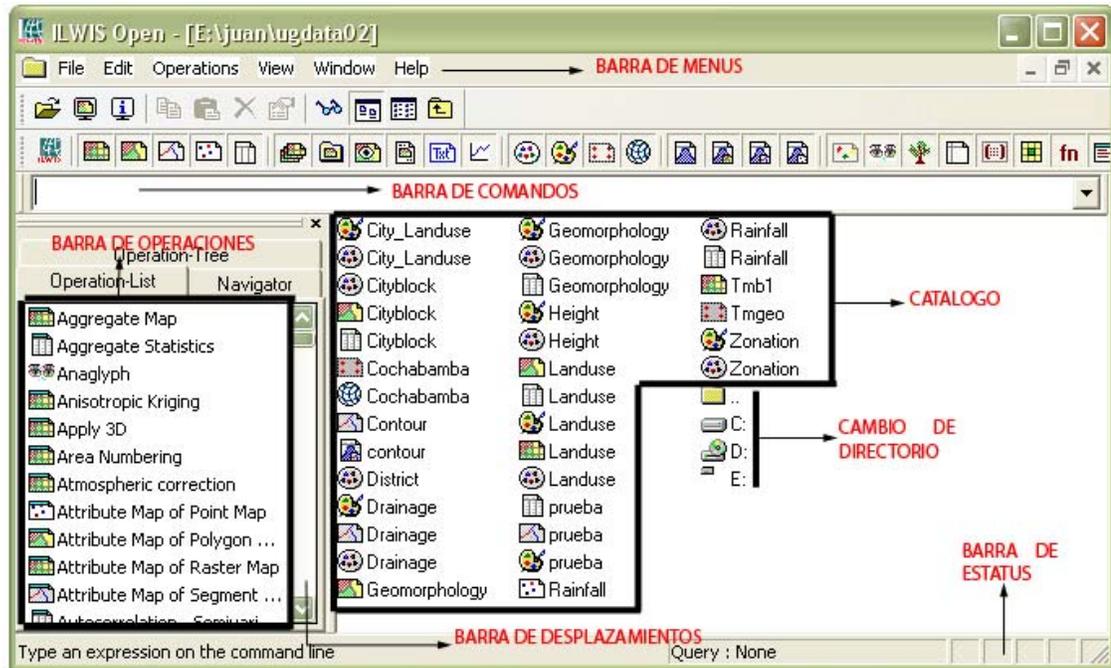


Figura 2.15 Ventana principal del SIG ILWIS 3.7

En la ventana principal, visualizamos elementos básicos de cualquier programa hecho para el sistema operativo Windows, como lo son las barras de desplazamiento, barras de menú, barras de estatus y barras de título por lo que no se profundizará en éstas; lo que si es importante explicar previo al catalogo y barra de operaciones, es la barra de comandos que viene a ser un complemento de la barra de operaciones, puede ser usada para escribir comandos y ejecutar operaciones. Cuando esta corriendo alguna aplicación o utilizando un comando se puede observar desplegado en esta línea el nombre del comando. En esta línea se puede hacer todas las operaciones que se desee, es decir; que es similar a la barra de comandos de programas creados por la empresa Autodesk (Autocad, Autocad Civil 3d, Autocad Land Desktop) quien distribuye programas reconocidos mundialmente.

En el área llamada “catálogo” que se muestra en la Figura 2.15 hay una serie de iconos, que representan toda la información que se crea en ILWIS, dicha información es creada con ayuda de la barra de operaciones, y a continuación en la Tabla 2.14 se presenta cada uno.

Tabla 2.14 Listados de iconos principales de ILWIS 3.7

Icono	Representa o ejecuta
	Sistema de coordenadas: Describe proyección y sistema de coordenadas.
	Georeferencia: Define la relación entre la rejilla en un mapa raster y las coordenadas del mapa
	Mapas raster
	Mapas de polígonos (formato vectorial)
	Mapas de segmentos
	Mapas de puntos
	Tabla de atributos: Para almacenar datos en formato tabular
	<p>Dominio: Describe los tipos de datos, y puede ser de 4 tipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Dominio de clase: que contiene clases de objetos, y como ejemplo podemos mencionar las unidades de uso de tierra, unidades geomorfológicas. 2. Dominio de identificador o también denominado ID; sirve para objetos que contiene un identificador único, ejemplos podemos mencionar numero de estación pluviométrica, numero de pozo perforado, numero de pozo excavado. 3. Dominio de valor: empleado para objetos que contienen medidas, cálculos o valores de interpolación, por ejemplo la profundidad freática. 4. Dominio de imagen: para el procesamiento y manejo de imágenes satelitales o fotografías aéreas, que contienen valores desde cero hasta 255.
	<p>Representación: Especifica cómo se visualizan los datos, y puede ser de 3 tipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Representación de clases: enlazada a un dominio de clases, el cual puede modificar el usuario definiendo el color que se despliega en pantalla para cada clase de objeto. 2. Representación de identificador: el cual no es definido por el usuario ya que los datos en el dominio de identificador por si solos dan un valor. 3. Representación de valor Actual y gradual: donde la representación de valor actual utiliza los valores actuales como limites para repartir los colores, mientras que la representación gradual utiliza valores de porcentajes como limites.

Todas las herramientas mencionadas anteriormente son vitales en la elaboración de mapas de vulnerabilidad, pero necesita de lo que llamamos “álgebra de mapas”, que son operaciones de cálculo que podemos realizar mediante un software SIG para obtener un nuevo mapa, en nuestro caso nos interesa obtener un mapa de vulnerabilidad para el método GOD y DRASTIC. Al realizar operaciones de álgebra de mapas en ILWIS, es importante saber que una expresión usualmente contiene operadores y funciones para especificar el cálculo a realizarse. Los nombres de mapas y las constantes que se usan en una fórmula son llamadas operandos. Cuando la expresión es ejecutada, el programa realiza el cálculo en cada píxel, empezando por el primer píxel en la primera fila, y continuando hasta el último píxel de la última línea (ITC, 2001).

En la Tabla 2.15 se explican las funciones básicas que son necesarias en la elaboración de mapas de vulnerabilidad.

Tabla 2.15 Definición de las funciones básicas para la evaluación de la vulnerabilidad

Función	Sintaxis	Operación
Condiciona IFF	IFF (a,b,c)	Si la condición “a” es verdadera, entonces devuelve el resultados de la expresión “b”, pero si la condición a es falsa, entonces devuelve el resultado de la expresión “c”
Relacional	INRAGE (a,b,c)	Chequea que tantos valores de la expresión o del mapa “a” están contenidos en el rango o intervalo cerrado definido por los valores “b” y “c”
Exponencial	HYP (a,b)	Calcula la raíz cuadrada positiva de la suma del cuadrado de “a” y el cuadrado “b”
Cálculo con propiedades	PIXSIZE (a)	Devuelve el valor del tamaño de píxel del mapa raster “a”

Fuente: Mario Escobar, et al. Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán. 2002.

Una de las ventajas de ILWIS es que considera que no todos los datos que se manejan son estáticos, ya que los parámetros pueden sufrir cambios intrínsecos como es el caso de la precipitación media y la recarga neta, también puede haber por adición de nueva información, o mejoras en la información original. La modificación de cualquier dato perteneciente a una tabla de ser ajustada con el resto de la información a partir de la ejecución de la opción “Update all columns” ubicada en el menú principal de la tabla.

Una vez modificada la información de las tablas es necesario actualizar los diferentes mapas relacionados a estas. Para ello se debe desplegar el cuadro de propiedades de tales mapas y ejecutar la opción de actualización (make up-to-date) ubicada en las propiedades de dependencia del mapa (Dependency) en la cual son listados todos los mapas relacionadas a éste.

La preparación de mapas de vulnerabilidad para su presentación se hace realizando una vista del mapa abriendo las ventanas ya sea de mapa vectorial o raster. En el menú file se elige la opción “save view”; luego se introduce el nombre de la vista y un título, creada la vista en el menú file de la ventana principal de ILWIS se elige “create/layout”, se abrirá una ventana donde podremos colocar la vista de nuestro plano, asignarle la escala que mejor se acomode al papel con que deseamos trabajar, además de colocar otros complementos como el norte, leyendas, escala gráfica y numérica, entre otras cosas. En la Figura 2.16 se muestra el resultado final de usar un SIG para generar un mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación.

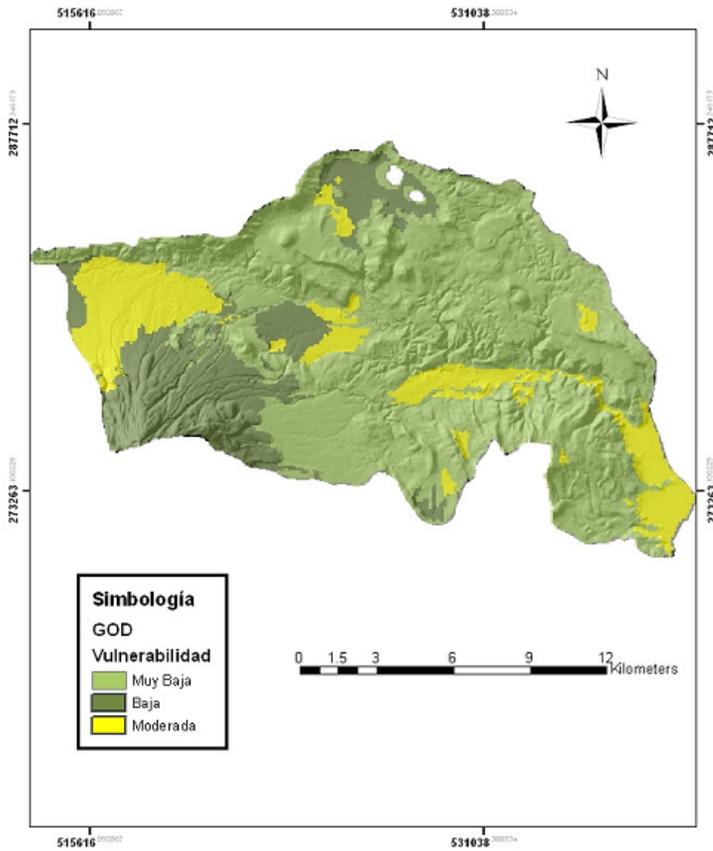


Figura 2.16 Ejemplo de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, resultado de la aplicación del método GOD y uso de un SIG.

Fuente: Gloria Cerros. Un enfoque de gestión ambiental del recurso hídrico desde la perspectiva de la vulnerabilidad de acuíferos. Trabajo de Graduación UCA. El Salvador. 2007.

CAPITULO 3. Aplicación de los métodos GOD y DRASTIC para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en la zona de estudio

3.1. Información de la zona de estudio

3.1.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

La zona de estudio es el sector donde se ubica el antiguo botadero de Mariona, este se localiza en el límite divisorio de los municipios de Nejapa y Apopa como se muestra en la Figura 3.3, a 2 km al Noreste del Volcán de San Salvador y 10 km del centro de San Salvador, en el Departamento de San Salvador, El Salvador. Tiene un área aproximada de 118,123.00 m². En la Figura 3.1 puede observarse la ubicación de este por medio de una foto aérea tomada de Google Earth.



Figura 3.1 Ubicación geográfica de la zona de estudio

Fuente: Imagen digital obtenida de Google Earth

El aparato utilizado para referenciar geográficamente el perímetro de la zona de estudio fue un GPS Garmin eTrex Vista® C, configurado con el sistemas de coordenadas cartográficas WGS 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984), con una precisión de 5 metros. Una vez establecidas las coordenadas de nuestra zona de estudio se procedió a ubicarlas en el mapa de municipios (ver Tabla 3.1, Figura 3.2 y 3.3).

Tabla 3.1 Coordenadas y elevaciones de los puntos del perímetro de la zona de estudio

Punto	Latitud	Longitud	Elevación
M-1	297613.00	477431.00	463.00
M-2	297643.00	477406.00	470.00
M-3	297670.00	477392.00	470.00
M-4	297767.00	477281.00	478.00
M-5	297753.00	477145.00	487.00
M-6	297738.00	476810.00	497.00
M-7	297717.00	476768.00	498.00
M-8	297720.00	476668.00	496.00
M-9	297714.00	476622.00	480.00
M-10	297676.00	476632.00	480.00
M-11	297645.00	476647.00	480.00
M-12	297613.00	476670.00	480.00
M-13	297595.00	476819.00	472.00
M-14	297541.00	477012.00	468.00
M-15	297590.00	477212.00	465.00
M-16	297601.00	477320.00	463.00
M-17	297594.00	477376.00	473.00

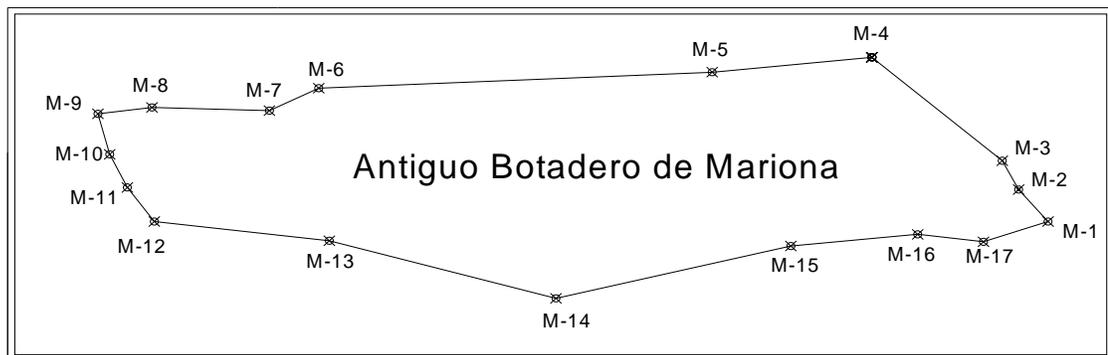


Figura 3.2 Delimitación de la zona de estudio

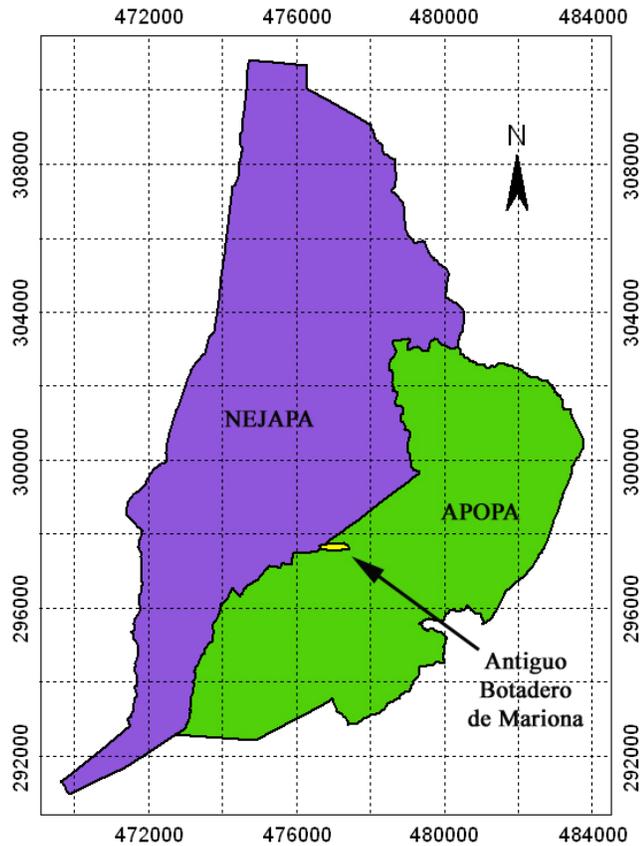


Figura 3.3 Ubicación de la zona de estudio entre los municipios de Nejapa y Apopa

A continuación se presenta una breve descripción de algunas características generales de la zona que son necesarias conocer para realizar cualquier estudio, algunas de ellas influyen directamente en la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación y otras influyen de manera indirecta, que dependerá del análisis que se haga para tomarlas en cuenta.

3.1.2. Características principales de la zona de estudio

No es fácil identificar lo que existía en la zona antes de que el antiguo botadero funcionara. Hay contradicciones entre la Alcaldía de San Salvador quien fue la responsable del manejo del botadero y las descripciones que dan los pobladores de la zona. De acuerdo con la gente de las comunidades que han vivido desde hace 12 ó 35 años, en la zona del antiguo botadero habían cuatro manantiales que utilizaban para

tomar agua, bañarse o lavar ropa, circundado de árboles de gran tamaño que daban sombra al sitio. En contraste, la Gerencia de Saneamiento Ambiental de la Alcaldía de San Salvador reporta que en el momento de la apertura del botadero, ya no existían ni los manantiales, ni la vegetación (Nottingham, Márquez 1998).

Según Nottingham (1998), la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) en informes que datan de 1975 a 1976, había declarado esa zona como importante fuente de agua, posteriormente procedió a iniciar un juicio de expropiación de pozos que pertenecían al Ingenio El Ángel para aumentar el caudal que se disponía a los clientes de ANDA en aquella época. Nottingham (1998) indica que la declaración de ANDA tenía mucha razón. El valle donde se encuentra el ex - botadero, ubicado dentro de la cuenca del Río Acelhuate, recibe el agua que cae sobre el lado norte del Volcán de San Salvador y la falda sur del cerro de Nejapa, parte de esta gran cantidad de agua corre hacia Nejapa, pero la mayoría del escurrimiento fluye en la dirección de Apopa a través de múltiples ríos y quebradas. El resultado es una zona llena de ríos y manantiales, con agua de alta calidad por la filtración natural de la roca volcánica y de la vegetación espesa de los cañales y cafetales del volcán (Nottingham, Márquez 1998).

Se desconoce las razones para la selección de este sitio para que funcionara el botadero; no hubo un análisis técnico, ni mucho menos una Evaluación del Impacto Ambiental (EIA), en el cual se debía conocer el grado de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación para determinar si el lugar era el adecuado o no. La decisión fue tomada por la administración del entonces Alcalde de San Salvador, Dr. Armando Calderón Sol.

El botadero comenzó a recibir la basura de San Salvador y Soyapango en 1992 y posteriormente de otros municipios, convirtiendo un terreno de cultivo de maíz, nacimiento de agua y bosque secundario maduro a botadero.

➤ Fuentes de Contaminación

Si bien esta investigación no está enfocada a determinar el riesgo como para proporcionarle tanta importancia a conocer las fuentes de contaminación, debemos tomar en cuenta que en la zona de estudio funcionó un botadero, por lo que tenemos una fuente de contaminación puntual y que es por medio de la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación que se logrará determinar las zonas que se encuentran mayormente expuestas al tránsito fácil de contaminantes.

El antiguo botadero recibía los desechos recolectados de 23 municipios, más el de las empresas privadas, generando aproximadamente 1,700 toneladas de desechos diarias, que representaba el 41% de la generación de todo el país. Acumulando al final aproximadamente 2,300,000 toneladas métricas. En el año de 1998, cuando el botadero estaba llegando al límite de su capacidad, se realizó un estudio en el que se encontraron elementos contaminantes en el agua subterránea y superficial del antiguo botadero (Nottingham, Márquez 1998). En los análisis realizados a las aguas superficiales se determinó una alta concentración de metales pesados, concentraciones de aluminio que exceden 31 veces el criterio de la norma establecida, coliformes (23 veces), boro (420 veces), Demanda Química de Oxígeno o DQO (282 veces), nitrógeno total (10 veces), fosfatos (720% el límite), etc. Para los análisis de aguas subterráneas se determinaron concentraciones elevadas de metales pesados como: Plomo, manganeso, cadmio, níquel, aluminio, boro, nitritos, entre otros (Nottingham, Márquez 1998).

El recurso superficial impactado es la quebrada Mano de León y otros arroyos afluentes del río Tomayate, en el caso de los recursos subterráneos es impactado el nacimiento de la Cuenca y mantos freáticos del área (Rubio, 1993).

Otras fuentes de contaminación que se ubican en la periferia del antiguo botadero son el establecimiento de compañías industriales tales como: Coca Cola, Jugos Jumex, Ingenio

El Ángel y la construcción de proyectos habitacionales que gastan y/o contaminan los recursos hídricos de la zona (Rivera y Aparicio, 2009).

Fue hasta el año 2001 que la administración de la Alcaldía de San Salvador comienza con el cierre técnico del antiguo botadero de Mariona conjuntamente con la OPAMSS y la empresa MIDES, y comenzar así el uso del relleno sanitario administrado por la empresa MIDES en el municipio de Nejapa (Rivera y Aparicio, 2009).

Las actividades que se realizaron en el cierre técnico del botadero fueron las siguientes (ver Figura 3.4):

- Recubrimiento de desechos.
- Siembra de grama.
- Construcción de zanjas y canaletas para aguas lluvias.
- Construcción de zanjas para recolección de lixiviados.
- Ventilación de biogás.
- Pozos de monitoreo de aguas subterráneas.
- Protección y delimitación de la zona con muro perimetral.

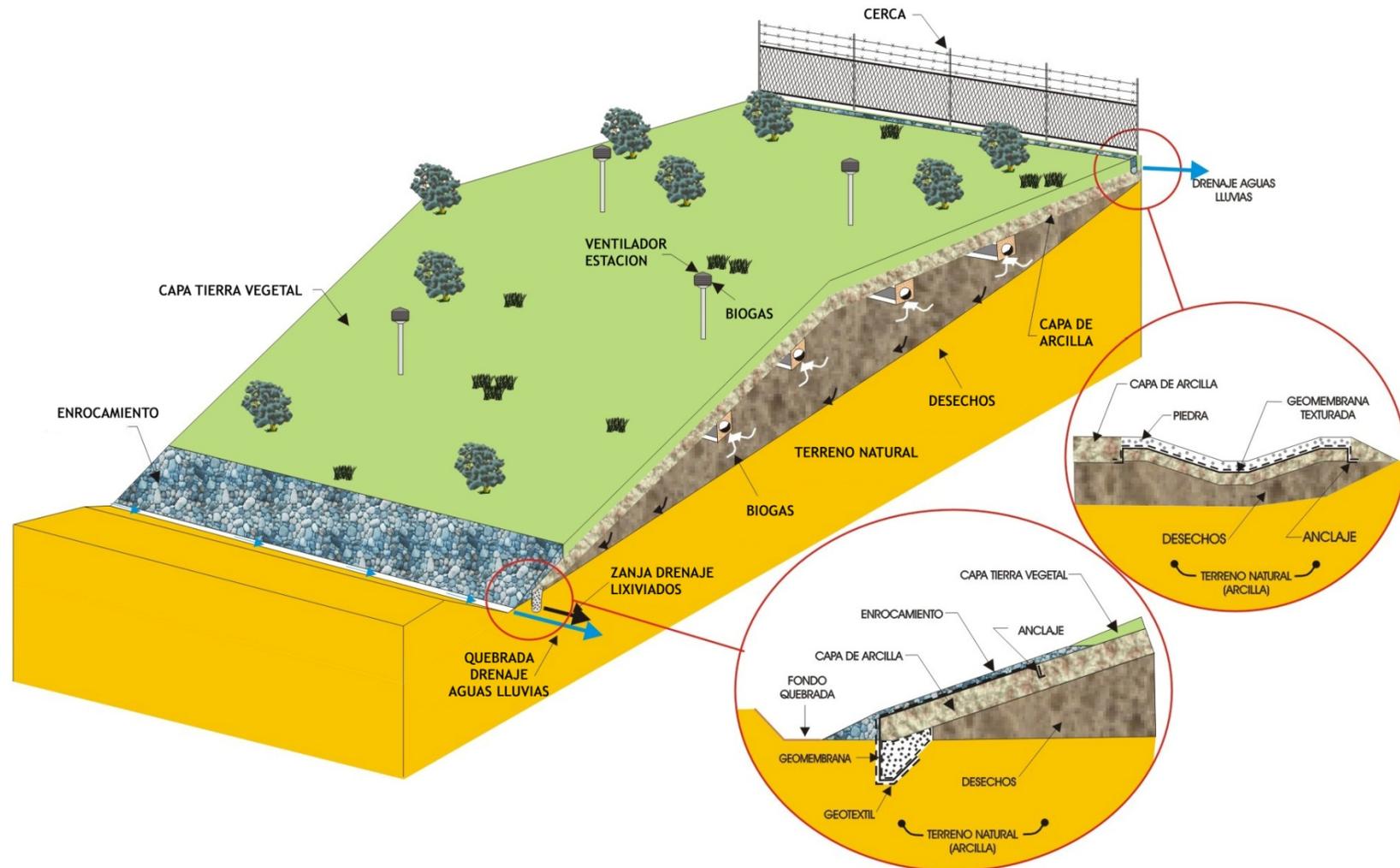


Figura 3.4 Obras que se realizaron en cierre técnico del botadero de Mariona

Fuente: MIDES, presentaciones de "Cierre técnico de botadero de Mariona", s.f.

De las visitas realizadas a la zona de estudio se observó durante los recorrido, que las mayorías de medidas tomadas en el cierre técnico han desaparecido, como el cerco perimetral, la ventilación del biogás, se encuentra la presencia de basura en una parte del antiguo botadero; específicamente cerca de los asentamientos humanos que se ubican a las orillas del mismo, presencia de lloraderos; asimismo se vio flujo de agua contaminada en la misma zona, posiblemente de aguas residuales producidas por la misma gente, además de flujo de lixiviados. El terreno es ocupado actualmente para pastar ganado, lo cual no es recomendable para la salud de las personas que consumen alimentos derivados de animales que se alimentan en estas condiciones.

En el capítulo 4 se retomarán las condiciones actuales de este lugar y se propondrán algunas medidas de seguimiento ambiental que vayan enfocadas a minimizar el daño causado por la presencia de este ex – botadero en el lugar, conociendo para ello el grado de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de toda la zona donde se ubica este antiguo botadero. En la Figura 3.5 se muestra una secuencia de fotografías de la evolución que se ha dado en la zona de estudio.



Figura 3.5 Fotografías que muestran la evolución del antiguo botadero de Mariona

A continuación se muestra información de diversas características de la zona, como: La geología, hidrogeología, relieve, hidrología, climatología, vegetación e información del perfil geoelectrico resultado del sondeo realizado por Rivera y Aparicio (2009).

➤ **Geología**

Dicha información es proporcionada por el mapa Geológico de El Salvador, el cual fue elaborado entre 1967 y 1971 por la Misión Geológica Alemana. Este se encuentra en escala 1:100,000 y 1:500,000 y puede ser obtenido en el Centro Nacional de Registros (CNR) y está disponible electrónicamente en la base de datos del MARN.

El miembro geológico en que se ubica el antiguo botadero de Mariona pertenece a la formación San Salvador, la cual esta compuesta por una secuencia de piroclastitas ácidas y efusivas ácidas-básicas intercaladas. Su edad es Pleistoceno Superior a Holoceno. La formación esta compuesta por los miembros: s2, s3'a, s4, s5'b y Qf. El miembro s2 está compuesto por una secuencia de coladas lávicas andesítico-basálticas, tanto en forma lajeada como escoriácea y presenta piroclastos intercalados. El miembro s3'a está constituido por una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas subordinadas, denominadas comúnmente "Tobas color café", las cuales en las cercanías del Volcán de San Salvador presentan intercalaciones de escoria negra y capas de suelos desarrollados en diferentes horizontes. El miembro s4 está formado por una secuencia de piroclastitas ácidas, lapilli, pómez y cenizas volcánicas y es denominado comúnmente como "Tierra Blanca". El miembro s5'b está compuesto por conos de escorias y en el sector del Boquerón por andesitas con fenocristales de labradorita, olivino y augita. Por su parte, los depósitos sedimentarios del Cuaternario (Qf) están constituidos principalmente por depósitos coluviales.

La geología de la zona de estudio específicamente es parte del miembro s4 (ver Figura 3.6), introducido por Wiesemann (1975: 561), lo define posteriormente (1978) como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, localmente

efusivas ácidas (s3'b). Es en parte contemporáneo con los miembros s2, s3'b, s5'a, s5'c, nombrado informalmente tierra blanca por Williams & Meyer-Abich (1953: 5-6), Weyl (1955:81) y no incluye las tobas ácidas subyacentes (miembro c1), equivalente a la Serie Superior de los Estratos de San Salvador (Dürr & Klinge; 1960a, 1960b).

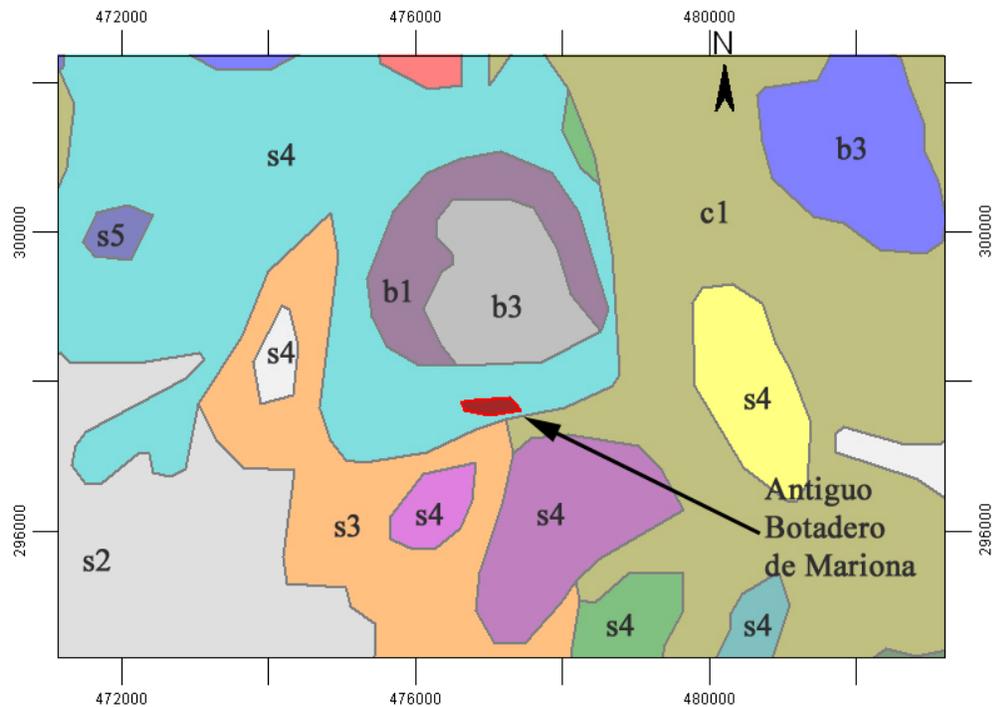


Figura 3.6 Geología de la zona de estudio según Mapa Geológico de El Salvador

Stirton & Gealey (1949: 1737) mencionan la secuencia en las Llanuras Volcánicas del Área de Valle Central Interior y la sección esta constituida por tobas pomezosas y brechas. Tanto los autores como Williams & Meyer Abich (1953: 5-6, 1955: 33) asumen que este material fue producto de la actividad del Volcán de San Salvador, guardando estrecha relación con los eventos volcano-tectónicos del lago de Ilopango. Posteriormente Meyer-Abich (1956: 76) reubica el evento en la depresión de Ilopango, durante el tercer y último hundimiento.

El espesor es superior a los 50 m en las cercanías del Lago de Ilopango (Schmidt-Thomé, 1975: 216) y se reduce a 4 m en la Ciudad de San Salvador; los fragmentos de pómez alcanzan tamaños de 25 a 30 cm (Baxter, 1979: 12), y xenolitos son frecuentes.

De acuerdo Steen McIntyre (Comunicación verbal) los espesores predominantes son hacia noreste y este del Lago de Ilopango, sugiriendo vientos en esas direcciones, Williams & Meyer-Abich (1953: 6) reportan por lo menos 5 capas de cenizas y pómez, mientras que la anterior reconoce dos miembros, a saber; el inferior, en la base una capa basal de Lapilli pumítico y ceniza gruesa vidriosa de 40 cm que decrece al alejarse del Lago Ilopango (Meyer-Abich, 1956: 76, reporta una capita de 1 a 5 cm de arena de pómez sobre un horizonte de descomposición de pómez más antiguo), seguido por una ceniza vidriosa fina a gruesa de tono ligeramente oscuro de un espesor de 6 m. La parte superior está constituida por una ceniza vidriosa fina a gruesa de tono ligeramente oscuro de 9 m de espesor, separada de la parte inferior por una capita de cristales bien clasificados y ceniza fina, o por un plano de partición de lapilli acrecionario o fragmentos de pómez. Baxter (1979: 13. 1980: 62) sugiere que el foco de erupción estuvo en el lado norte el Lago de Ilopango a unos 800 m al oeste de portón de acceso a Club Salvadoreño. De acuerdo a Weyl (1955:86) el principal constituyente es vidrio, además de plagioclasas frescas (An 35-An 55), hornblenda verde ocasionalmente hornblenda café, hiperstena, clinaugita, magnetita; entre los minerales accesorios biotita, enstatita, titanita, zircón, epidota y granate. Clasifica las capas de pómez a partir de análisis químicos como procedentes de un magma cuarzo-diorítico hasta leuco-cuarzo-diorítico. Según Sheets (1976: 9), las erupciones acontecieron en un período corto de tiempo, entre 1 D.C.- 300 D.C. Según evidencias arqueológicas, datación geológica (Weber, en Sheets) con C14 lo ubica aproximadamente en el mismo periodo, en el año 260 D.C. \pm 85.

➤ **Hidrogeología**

La zona donde se ubica este antiguo botadero se encuentra localizada en la unidad “Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media” (ver Figura 3.7), los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapilli, tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa.

Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al gradeo, cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituyen. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.

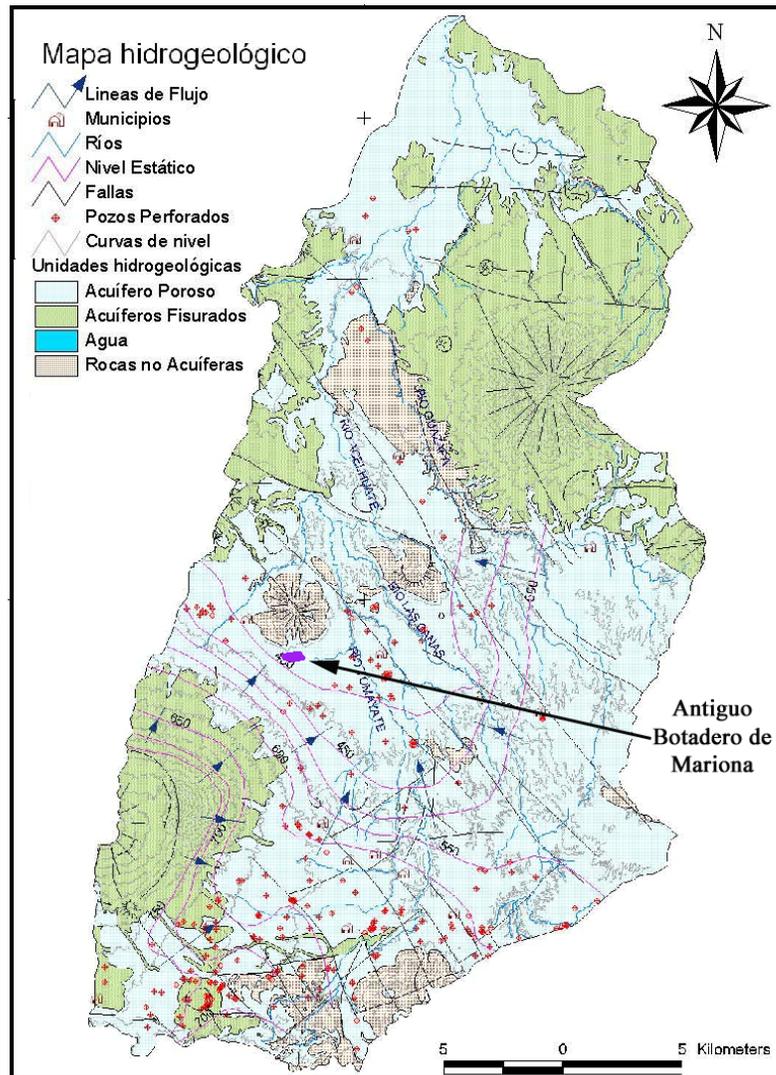


Figura 3.7 Ubicación de la zona de estudio en el mapa hidrogeológico de la cuenca del Río Acelhuate

Fuente: Laura Gil. Mapa y estudio de recarga acuífera del área metropolitana de San Salvador. 2007

➤ **Relieve**

Apopa y Nejapa son municipios situados a una altitud de 200 a 500 msnm (ver Figura 3.8), y se encuentran entre la Cadena Costera y la Cordillera Fronteriza caracterizadas por una topografía plana comparada con las fuertes pendientes de los sistemas orográficos que la limitan. Este ex - botadero se sitúa a una altura promedio de 480 msnm (Rivera y Aparicio, 2009).

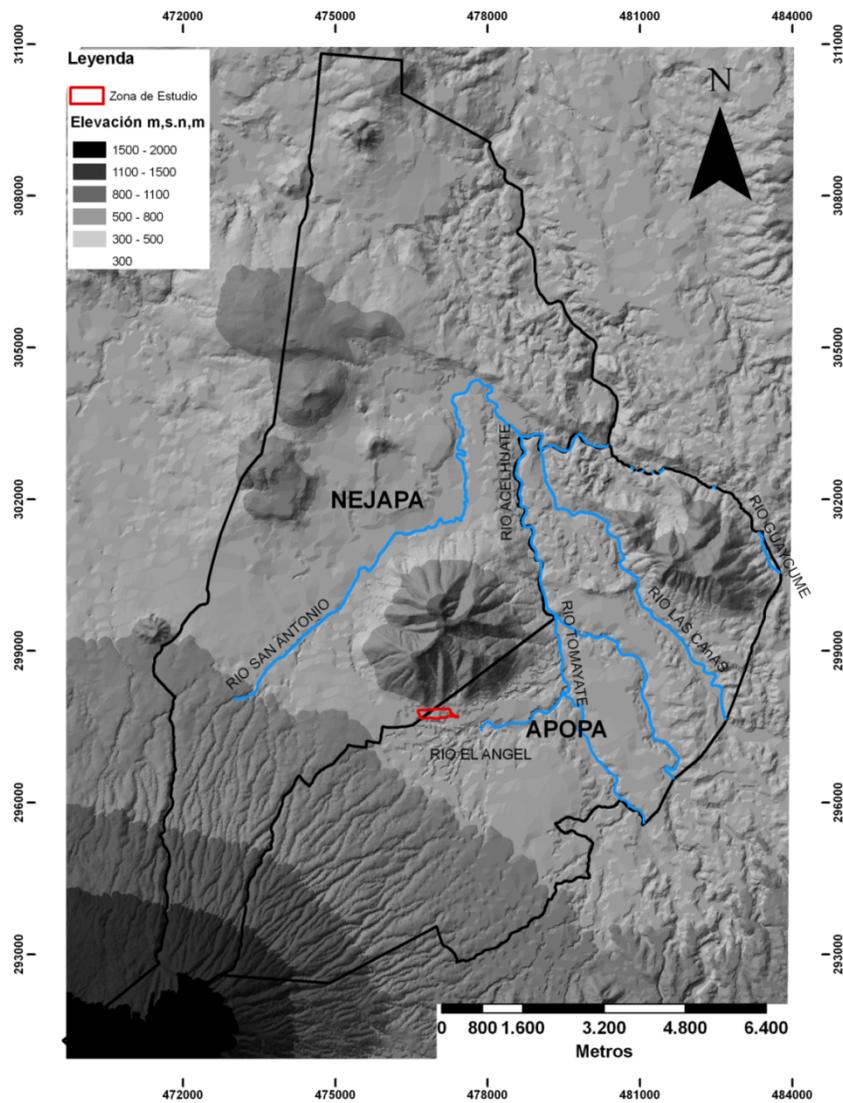


Figura 3.8 Mapa de elevaciones de los municipios de Apopa – Nejapa

Fuente: Francisco Rivera, Osmany Aparicio. Evaluación geoelectrica del antiguo botadero de residuos sólidos urbanos de Mariona. 2009.

➤ Hidrología

La zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona se encuentra ubicada dentro del perímetro de la cuenca del Río Acelhuate, como se muestra en la Figura 3.9, esta forma parte del sistema hidrográfico del Río Lempa, y en su trayecto hacia la

desembocadura, recibe el aporte de varios efluentes, entre ellos: La quebrada Montserrat, Arenal de Mejicanos, quebrada Tutunichapa -Tomayate, y los ríos El Ángel, Ilohuapa, Las Cañas, Guazapa y Tasajera (Rivera y Aparicio, 2009).

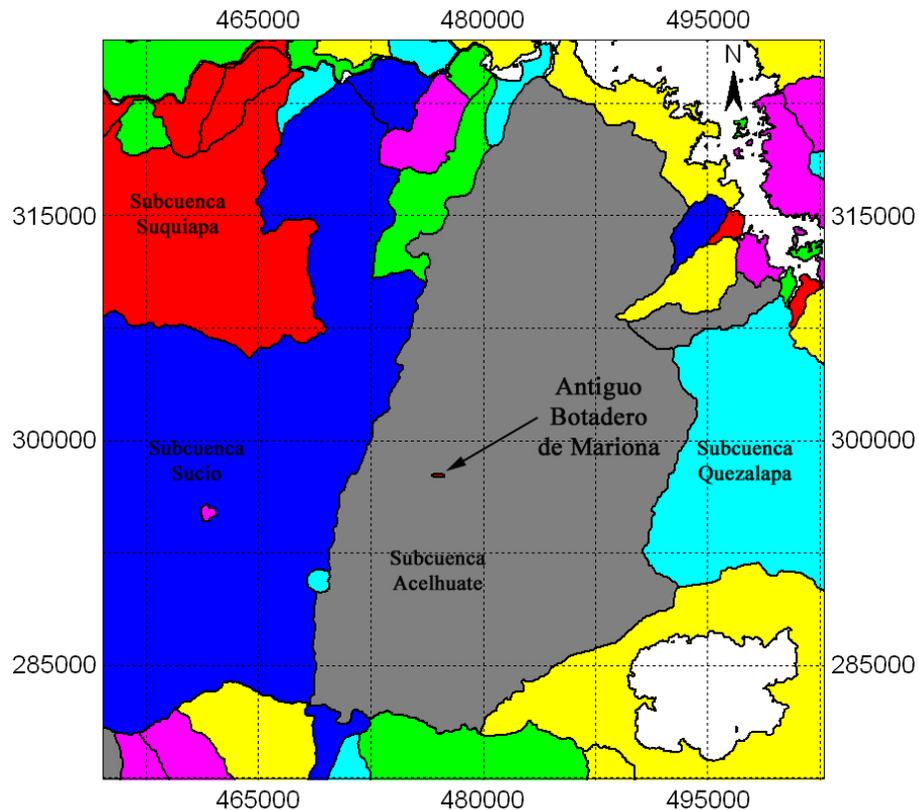


Figura 3.9 Ubicación de la zona de estudio en el mapa de cuencas de El Salvador

➤ Climatología

La zona de estudio presenta una precipitación promedio anual que varía entre 1400 – 2400 mm, un rango de temperatura que varía desde 10° C hasta 28° C. (Rivera y Aparicio, 2009).

➤ **Vegetación**

El uso de suelo para el cual estaba destinada esta zona era para pastos y granos básicos, pero además este antiguo botadero está muy cercano a áreas urbanas (ver Figura 3.10).

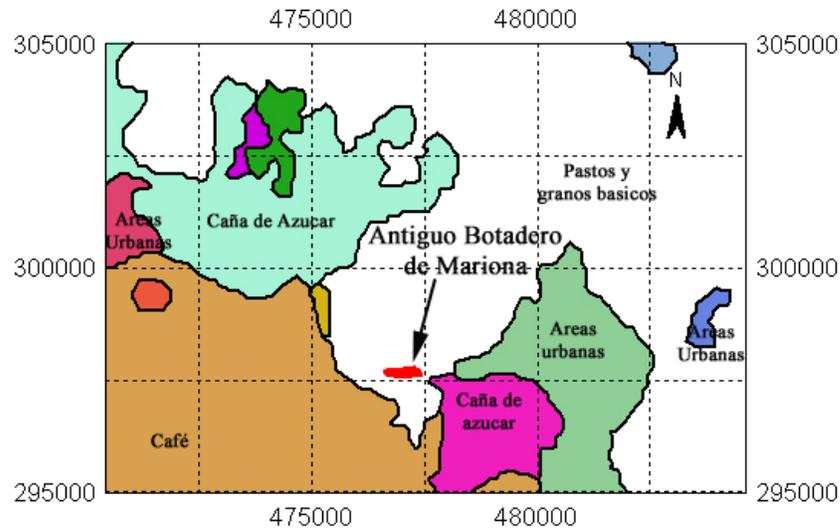


Figura 3.10 Ubicación de la zona de estudio en mapa de uso de suelos

➤ **Perfil Geoeléctrico**

Rivera y Aparicio (2009) establecieron la presencia de 4 capas en la zona del ex - botadero con la ayuda de información de tres sondeos eléctricos verticales, los cuales fueron interpretados utilizando datos estratigráficos de la zona de estudio y con el auxilio de inventario de pozos determinaron el nivel freático del acuífero, a continuación mencionamos qué material contienen estas 4 capas (ver Figura 3.11):

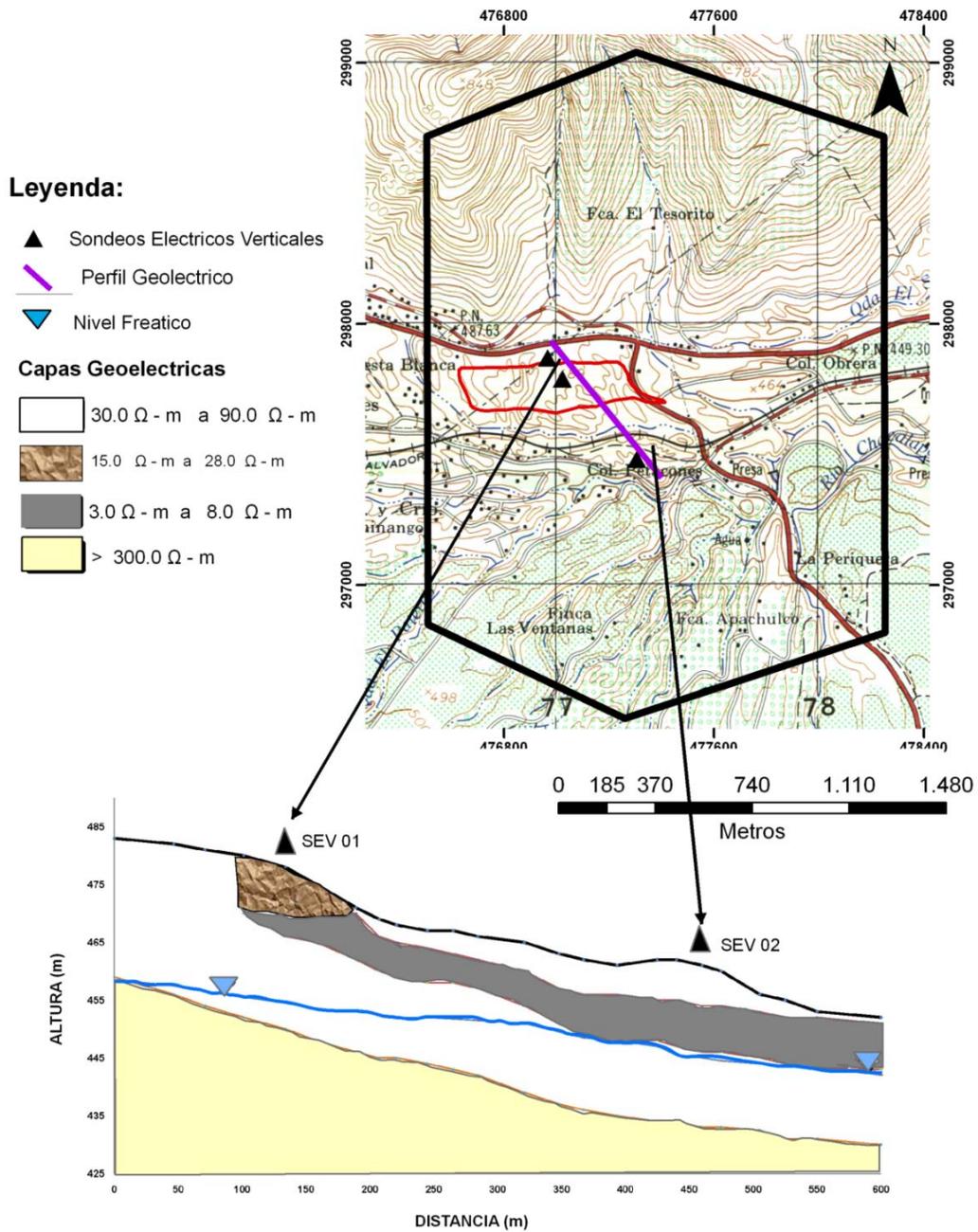


Figura 3.11 Perfil geoelectrico de un sector donde se ubica el antiguo botadero de Mariona
 Arriba: Muestra la ubicación de la realización de los Sondeos Eléctricos Verticales. Abajo: Perfil elaborado con la información de los Sondeos Eléctricos Verticales

Fuente: Francisco Rivera, Osmany Aparicio. Evaluación geoelectrico del antiguo botadero de residuos sólidos urbanos de Mariona. 2009.

- La primera capa, se encuentra en un rango de $30 \Omega - m$ a $90 \Omega - m$, la cual se extiende a lo largo de todo el perfil con un espesor de aproximadamente de 25 m. de tierra blanca (Piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas).
- La segunda capa, con resistividades $15 \Omega - m$ a $28 \Omega - m$, la cual solo se observa por debajo de donde está ubicado el botadero. Lo que permite inferir que esta capa está asociada probablemente a material de desechos urbanos, que han producido lixiviados de elevada concentración ($4 \Omega - m$) en la base del botadero. El espesor de dicha capa es de aproximadamente 10 m.
- La tercera capa, se encuentra en un rango de $4 \Omega - m$ a $8 \Omega - m$, y no se refleja en todo el perfil debido a que está asociada a la pluma de contaminante (lixiviado) proveniente del ex - botadero la cual se observa a partir de donde están depositados los desechos hacia una dirección Sur – Este, en la dirección de las líneas de flujo de las aguas subterráneas. El espesor de dicha capa es de aproximadamente 5 m.
- La cuarta capa, la resistividad es $> 300.0 \Omega - m$ se observa en todo el perfil y está asociada a lavas volcánicas, constituye el basamento geoelectrico. Su espesor no se pudo determinar con la exploración de los sondeos eléctricos verticales.

A continuación se presenta la aplicación de los métodos GOD y DRASTIC, la elaboración y presentación de los mapas que muestran el grado de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica este antiguo botadero, conociendo que para ello se trabajó con las condiciones originales del terreno, es decir antes que el botadero estuviese funcionando.

3.2. *Elaboración del mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas con la aplicación del método GOD*

3.2.1. Presentación de información de parámetros GOD

3.2.1.1. Tipo de acuífero (G = Ground water occurrence)

Este parámetro que corresponde simbólicamente a la letra “G” que aparece en el acrónimo GOD y que en inglés se refiere a “Ground water occurrence”, describe el tipo de acuífero que se presenta en la zona.

De la Figura 3.11, que muestra el perfil geoelectrico de la zona de estudio, concluimos que este acuífero es del tipo libre, el cual está formado por piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, conocidas comúnmente como tierra blanca, están semiconsolidadas; por lo que lo podemos catalogar de acuerdo a la clasificación de este parámetro como un acuífero no confinado y basándonos además en la Figura 2.12, le asignamos una ponderación de 0.6.

Por ser relativamente una zona pequeña concluimos que en toda ella se presenta el mismo tipo de acuífero.

3.2.1.2. Litología de la cobertura (O = Overall aquifer class)

De acuerdo a la Figura 3.11 que muestra el perfil geoelectrico de la zona del antiguo botadero y del mapa geológico del país, se pudo determinar que la litología de la cobertura de la zona de estudio está compuesta por piroclástitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, conocidas comúnmente como tierra blanca.

En la Figura 2.12 del capítulo 2, se puede observar que no aparece directamente el nombre del tipo de litología de la cobertura que existe en nuestra zona de estudio, por lo

que se tomó esta de una tabla adaptada de la litología de las diferentes coberturas de San Salvador (Tabla 3.2), dando como resultado la ponderación de este parámetro 0.80; dicha tabla tiene origen en el trabajo de graduación de tesis de postgrado en Geología de Arévalo Herrera en 2005, el cual se denomina “Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca del Acuífero Opico-Quezaltepeque, a través de datos geofísicos, pozos y análisis Hidrogeoquímicos”.

Esta misma litología de la cobertura se presenta en toda la zona de estudio; por lo cual toda ella tendrá el mismo índice de evaluación.

Tabla 3.2 Litología de la cobertura para el área de San Salvador

LITOLOGIA	CARACTERISTICAS	INDICE DE EVALUACION
Efusivas básicas intermedias (lavas escoriaáceas).	Alta porosidad.	1.00
Efusivas básicas intermedias, piroclastitas subordinadas.	Alto grado de fracturamiento.	0.90
Piroclastos pocos consolidados.	Poco consolidados.	0.80
Efusivas básicas intermedias, piroclastitas subordinadas.	Alto grado de fracturamiento.	0.90
Piroclastitas acidas, epiclastitas volcánicas (tobas café)	Grado medio de compactación.	0.70
Cenizas volcánicas y tobas de lapillo.	Grado medio de Compactación.	0.70
Piroclastitas acidas y epiclastitas volcánicas subordinadas (tierra blanca).	Poco consolidados.	0.80
Piroclastitas acidas, epiclastitas volcánicas (ignimbritas).	Grado medio de facturación.	0.70
Depósitos sedimentarios del cuaternario.	Granulometría heterogénea y poco compacta.	0.90

Fuente: Cesar Alvarado. Modelo Conceptual y Vulnerabilidad Intrínseca del Acuífero Quezaltepeque-Nejapa. 2007

3.2.1.3. Profundidad del acuífero (D = Depth)

Para la determinación de este parámetro conocido por “D” que en inglés es “depth” que significa la profundidad al nivel freático desde la superficie del terreno, se necesitaba de información sobre niveles freáticos y la altimetría de la zona, por lo que se contó con la información de los pozos de alrededor de la zona de estudio, tomada del inventario (ver

Tablas 3.3 y 3.4, para visualizar localización de puntos de agua dirigirse a Anexo 2) que aparece en la tesis “Evaluación geoelectrica del antiguo botadero de residuos sólidos urbanos de Mariona”, además del archivo ArcView Shape (.shp) con curvas de nivel a cada diez metros, dando como resultado el mapa que muestra el nivel freático en cada sector de este lugar, ponderando para ello según sea su profundidad, tal como aparece en la Figura 2.12 del capítulo 2.

Tabla 3.3 Inventario de pozos cercanos a antiguo botadero de Mariona

No	Lugar	Nivel freático (msnm)	Longitud	Latitud	Municipio
1	Botadero	450.6	477505.08	297665.30	Apopa
2	La puerta	455.0	477368.24	298032.64	Apopa
3	Col. Obrera	430.0	477621.17	297616.03	Apopa
4	Col. Obrera	424.0	478010.36	297894.83	Apopa
5	Finca Tesorito	457.0	477256.78	298218.66	Apopa
6	Caserio Suchinango	451.0	476616.00	297608.21	Apopa
7	Caserio Suchinango	451.0	476595.98	297611.30	Apopa
8	Periquera	437.0	477880.08	297161.01	Apopa
9	Caserio Suchinango	451.0	476444.20	297486.98	Apopa
10	Caserio Suchinango	446.0	476620.99	297585.16	Apopa

Fuente: Francisco Rivera, Osmany Aparicio. Evaluación geoelectrica del antiguo botadero de residuos sólidos urbanos de Mariona. 2009.

Tabla 3.4 Inventario de manantiales cercanos a antiguo botadero de Mariona

No	Lugar	Nivel freático (msnm)	Longitud	Latitud	Municipio
1	Chacalapa	424.0	477749.94	297171.88	Apopa
2	La Periquera	451.0	477949.62	297109.22	Apopa
3	La Pila del Sanjon	455.0	477341.55	297269.54	Apopa
4	Quebrada del muerto	448.0	477096.35	297373.73	Apopa
5	Quebrada las lajas	469.0	477679.88	297202.67	Apopa

Fuente: Francisco Rivera, Osmany Aparicio. Evaluación geoelectrica del antiguo botadero de residuos sólidos urbanos de Mariona. 2009.

3.2.2. Procesamiento de información

Al usar el software ILWIS se necesita crear una carpeta que contenga cada uno de los archivos que se originarán para la creación del mapa de vulnerabilidad, esta carpeta se creó desde el explorador de Windows y la llamamos “Antiguo Botadero de Mariona”, luego abrimos ILWIS y como si estuviéramos en el explorador de Windows buscamos el

sitio donde creamos esa carpeta para comenzar a crear el mapa de vulnerabilidad. También creamos otra carpeta, denominada “Información base” para guardar mapas de formato ArcView Shape y tablas que será necesario importar a ILWIS durante el proceso de creación de mapas de vulnerabilidad.

- **Delimitación de la zona de estudio**

Lo primero que se hizo en la creación de los mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación, tanto para el método GOD como para DRASTIC es la delimitación de nuestra zona de estudio, siendo el proceso el que se describe a continuación:

1. *Ubicación de puntos de perímetro de antiguo botadero de Mariona mediante GPS*, el proceso fue ir anotando las coordenadas geográficas y sus elevaciones en la zona de estudio (dicha información fue presentada en la Tabla 3.1).
2. *Traslado de datos de puntos a Microsoft Office Excel*, se guardo el archivo como “CSV (delimitación por comas)”, aunque también se pudo guardar como “Texto con formato (delimitado por espacios)”; no habiendo diferencia de escoger uno u otra forma de guardarlo.
3. *Importación de tabla de datos de puntos de perímetro de antiguo botadero de Mariona a ILWIS*, los pasos fueron los siguientes:
 - 3.1. En la ventana principal del programa fuimos a la barra de menús, luego a “File”, “Import”.
 - 3.2. Se localizó las herramientas para importar tablas en “Table”, y se eligió el formato “Comma delimited” (ver Figura 3.12).
 - 3.3. Se buscó el archivo Excel previamente hecho en “input”.

- 3.4. Nos dirigimos a “Options” (esta herramienta aparece cuando ya se ha elegido el archivo a importar) donde se vió inicialmente la información que contenía nuestro archivo para tener claro qué tipo de dominio debíamos de asignarle; en nuestro caso teníamos coordenadas y elevaciones las cuales son asignadas como dominios “value”; aunque por defecto el software identifica el tipo de dominio que debe ser la información, dentro de esta ventana se asigno nombres a las columnas dando doble clic en la columna que se deseaba asignar nombre en “Column Name”; no habiendo otros cambios se dio clic en finalizar, lo que nos regresaba a la ventana para importar datos.
- 3.5. Se asignó el nombre a la tabla, colocando el nombre en “Output”, en nuestro caso la llamamos “perimetro” luego sólo se dió “OK” para que fuese importada la tabla a ILWIS.

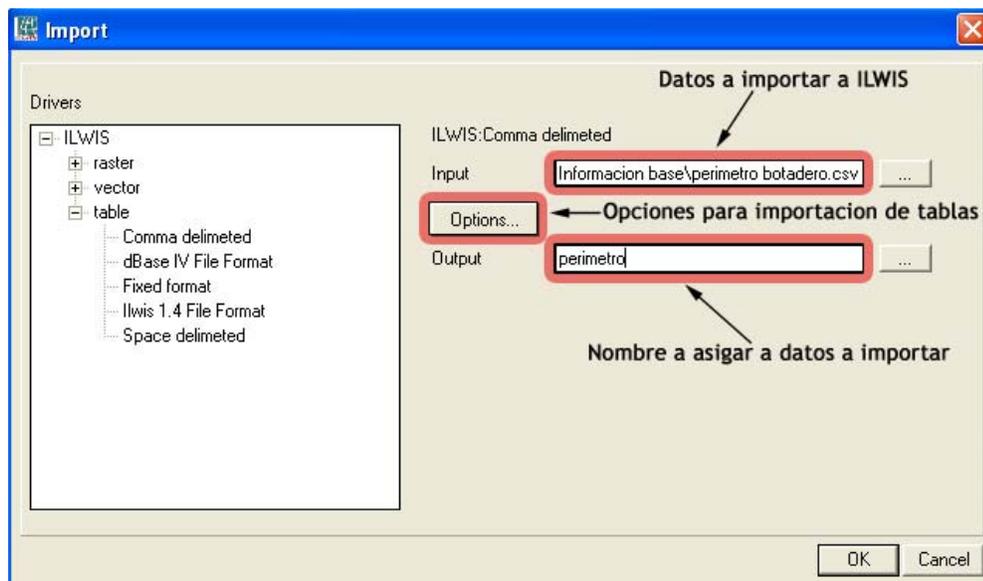


Figura 3.12 Ventana para importar datos en ILWIS 3.7

4. *Creación de mapa de puntos de perímetro de antiguo botadero de Mariona, el procedimiento fue el siguiente:*

- 4.1. En la ventana principal del programa se dió clic derecho sobre la tabla que llamamos “perimetro” y se eligió la opción “Table Operations”, “Table to Point Map” (ver Figura 3.13).
- 4.2. Elegimos las coordenadas “X” y “Y” de los puntos que deseábamos ingresar.
- 4.3. En “Coordinate System” seleccionamos “Unknow”, ya que esta opción acomodó automáticamente el mapa dependiendo de las coordenadas de la tabla.
- 4.4. Dejamos activada la opción “Use Table Domain” porque no fue necesario usar las elevaciones obtenidas por medio del GPS.
- 4.5. Por último en la barra de “Output Point Map” dimos el nombre de nuestro mapa de puntos en este caso lo llamamos “perimetro”.
- 4.6. Procedimos a presionar “Show”, para visualizar el mapa que estábamos creando (ver Figura 3.14), en caso de no querer verlo sólo se presionaba “Define”.

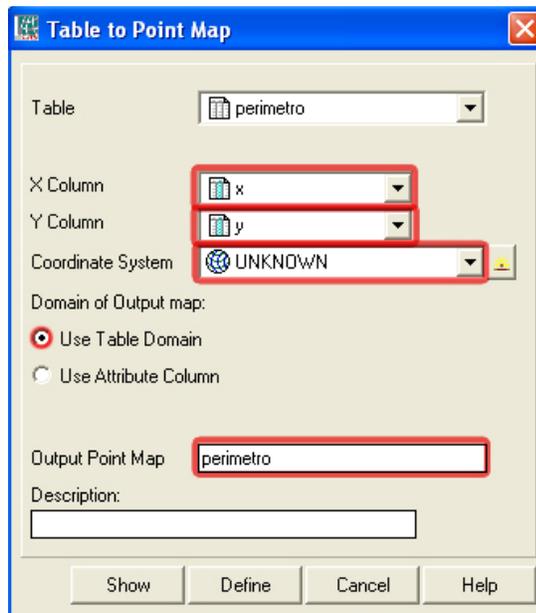


Figura 3.13 Ventana de configuración para creación de un mapa de puntos a partir de una tabla en ILWIS 3.7

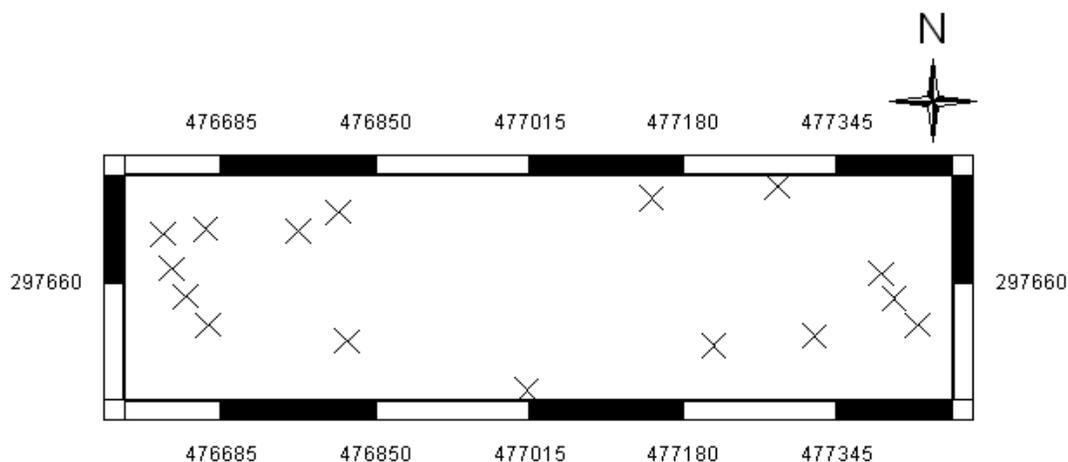


Figura 3.14 Mapa de puntos del perímetro de antiguo botadero de Mariona

5. *Creación de mapa en formato vectorial o mapa de polígonos de perímetro de antiguo botadero de Mariona*, con el mapa de puntos creado, unimos los puntos para poder interceptar nuestra zona de estudio con los otros mapas con que se contaba, por lo que hicimos lo siguiente:

- 5.1. En la ventana principal de ILWIS dimos clic derecho en el mapa de puntos llamado “perímetro” y nos dirigimos a “Polygon Operations”, “Convex Hull” (ver Figura 3.15).
- 5.2. En la opción “Combination Rule” elegimos la alternativa “All” para unir todos los puntos.
- 5.3. En la barra “Output Polygon Map” se seleccionó el nombre del mapa de polígonos a crear, que llamamos “perímetro”; para finalizar elegimos “Show” (el resultado de este proceso lo podemos ver en la Figura 3.16).

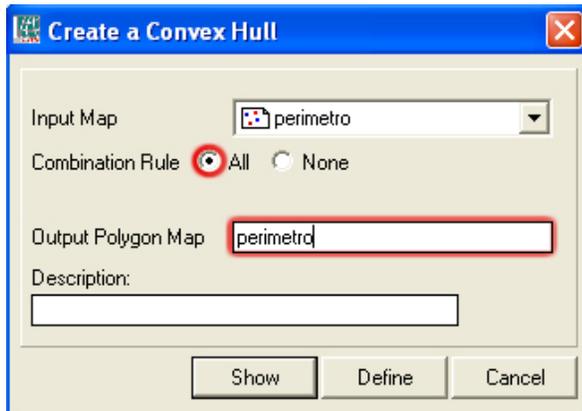


Figura 3.15 Ventana para creación de mapa de polígonos a partir de mapa de puntos en ILWIS 3.7

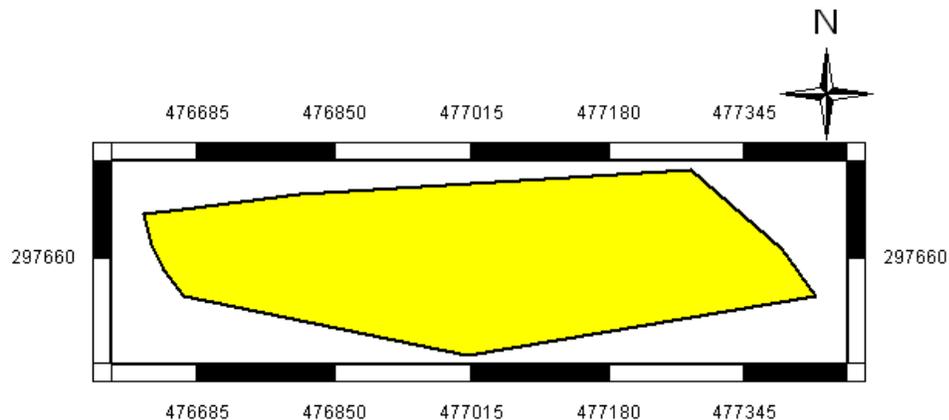


Figura 3.16 Mapa de polígonos de perímetro de antiguo botadero de Mariona

6. *Creación de mapa Raster de perímetro de antiguo botadero de Mariona*, el proceso para elaborar este mapa fue el siguiente:

- 6.1. En la ventana principal del programa dimos clic derecho al mapa de polígonos creado llamado “perimetro”, elegimos la opción “Polygon to Raster” (ver Figura 3.17).
- 6.2. En “Output Raster Map” llamamos al nuevo mapa “perimetro”.
- 6.3. Creamos una georeferencia, esto puede hacerse antes de entrar a esta ventana o dentro de la misma, seleccionando el icono para creación de georeferencia que indica la Figura 3.17, esto abrirá la ventana que se muestra en Figura 3.18 respecto a la creación de referencias geográficas para formato raster, este archivo

nos será de mucha importancia para la creación de posteriores mapas; en “GeoReference Name” llamamos nuestra georeferencia “perimetro”; en “Coordinate System” seleccionamos “Unknow” y dejamos activado “Center of Corner pixels”, esto nos sirvió para que las coordenadas de las esquinas de nuestro mapa vectorial se colocaran en el centro del píxel de las esquinas del mapa raster, luego solo dimos “OK” para regresar a la ventana de la Figura 3.17.

- 6.4. Para finalizar solo elegimos en “GeoReference” la georeferencia creada y dimos un clic en “Show”.

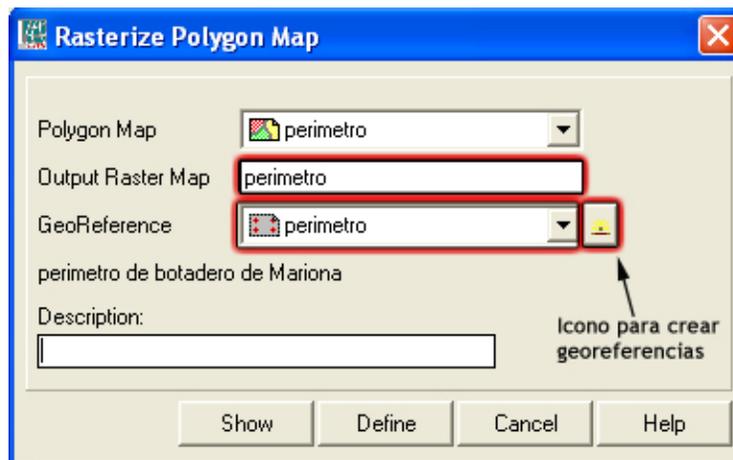


Figura 3.17 Ventana para conversión de formato vectorial a raster en ILWIS 3.7

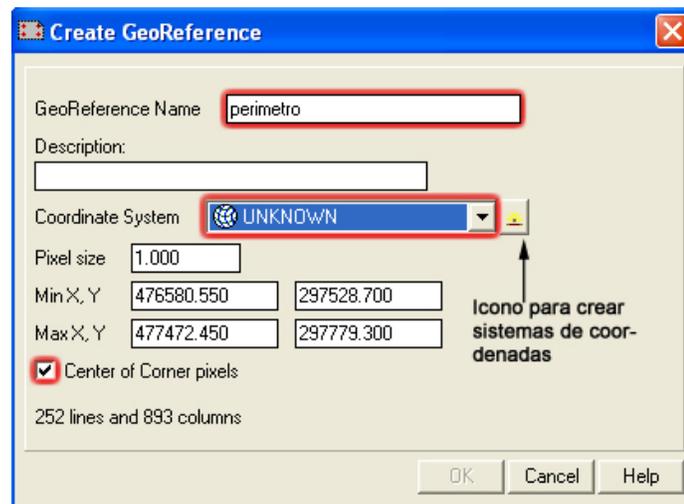


Figura 3.18 Ventana para creación de georeferenciación en ILWIS 3.7

7. *Creación de mapa de segmentos de perímetro*, éste lo obtuvimos de la siguiente manera:

- 7.1. En la ventana principal del programa ILWIS dimos clic derecho en el mapa de polígonos “perímetro” y nos dirigimos a “Vectorize”, “Polygon to Segment”.
- 7.2. Encontramos dos opciones que dejaremos por defecto; la opción “Mask”, que permite buscar polígonos con un nombre específico. Si se tiene activado “*” buscará todos los polígonos que existan, y la opción “Single Name” es usada cuando queremos imponer un nombre único a todos los polígonos dentro de un mapa de polígonos seleccionado (ver Figura 3.19).
- 7.3. Asignamos el nombre al mapa de segmentos en “Output Segment Map” en nuestro caso lo llamamos “perímetro”.
- 7.4. Clic en “Show” para ver el mapa de segmentos.

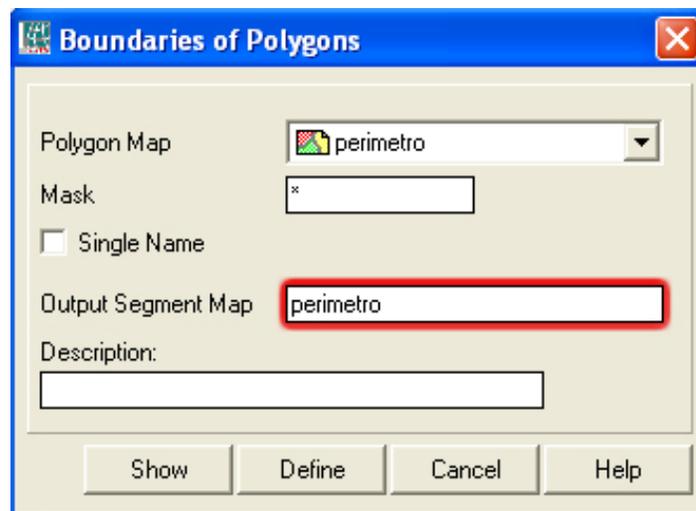


Figura 3.19 Ventana para conversión de mapa de polígonos a mapa de segmentos en ILWIS 3.7

Es importante destacar que en todas las ventanas se colocó la descripción de lo que contiene cada archivo en la barra de la opción “Description”, y además aclarar que todos los mapas elaborados bajo el mismo nombre se diferenciarán por el icono que les asigna el programa, además de que las extensiones de estos archivos varían.

A continuación se describe el proceso realizado para crear los mapas de cada uno de los parámetros del método GOD, cuando así se requiera, para generar mediante la multiplicación de éstos, el mapa que nos muestre la vulnerabilidad de las aguas subterráneas existente en la zona del antiguo botadero de Mariona.

- **Parámetro “G” de GOD**

Como ya se explicó anteriormente, toda la zona está ubicada en un acuífero no confinado, por lo que no es necesario la creación de un mapa, en este caso sólo se le asigna su ponderación respectiva, lo cual ya se hizo.

- **Parámetro “O” de GOD**

Respecto a este parámetro no se hará procesamiento para crear un mapa, ya que se presenta un sólo tipo de cobertura en toda la zona de estudio y por ello un solo valor de ponderación del mismo.

- **Parámetro “D” de GOD**

Para este parámetro primero explicaremos como se generó el mapa de nivel freático, luego el MED y por último el mapa de profundidad de las aguas subterráneas.

El proceso para generar el mapa de nivel freático fue el siguiente:

1. *Traslado de datos de pozos y manantiales a Microsoft Office Excel*; proceso similar al explicado en la delimitación de perímetro, numeral 2 (los archivos fueron llamadas “pozos” y “manantiales”).

2. *Importación de tabla de datos de pozos y manantiales*; se siguió el proceso mencionado en la delimitación de perímetro numeral 3, solo que se asignó el nombre de “NF” a la columna que tiene el dato de nivel freático.

3. *Unión de tabla de pozos y manantiales*; seguimos los siguientes pasos:

- 3.1. Clic derecho a la tabla de “manantiales” (también pudo haber sido la tabla “pozos”) dentro de la ventana principal y nos dirigimos a “Table Operation”, “Glue Tables” (ver Figura 3.20).
- 3.2. En “Number of Input Tables” seleccionamos “2”.
- 3.3. En “2nd Table” elegimos la tabla “pozos”.
- 3.4. En “Output Table” escribimos el nombre de la nueva tabla, la cual llamamos en nuestro caso “manantiales y pozos”.
- 3.5. Activamos la casilla “Vertical”.
- 3.6. Para finalizar clic en “Show”.



Figura 3.20 Ventana para unir tablas en ILWIS 3.7

4. *Creación de mapa de puntos de nivel freático*; el mapa de puntos creado lo llamamos “nivel_freático”, con el procedimiento explicado en la delimitación de zona de estudio numeral 4, con la diferencia que ahora elegimos “Use Column of Table” y se seleccionó la columna llamada “NF”.

5. *Interpolación de mapa puntos de nivel freático*; para este procedimiento hicimos uso del método “Kriging”, ya que es de los métodos más utilizados en interpolación y creación de curvas de contorno; y seguimos los siguientes pasos:

- 5.1. Clic derecho a nuestro mapa de puntos en la ventana principal y nos dirigimos a “Interpolation”, “Kriging...” (ver Figura 3.21).
- 5.2. No cambiamos las opciones por defecto, pero sí seleccionamos en “GeoReference” la georeferencia llamada “perímetro”.
- 5.3. En “Output Raster Map” llamamos al mapa “nivel_freatico”, para terminar, clic en “Show”.

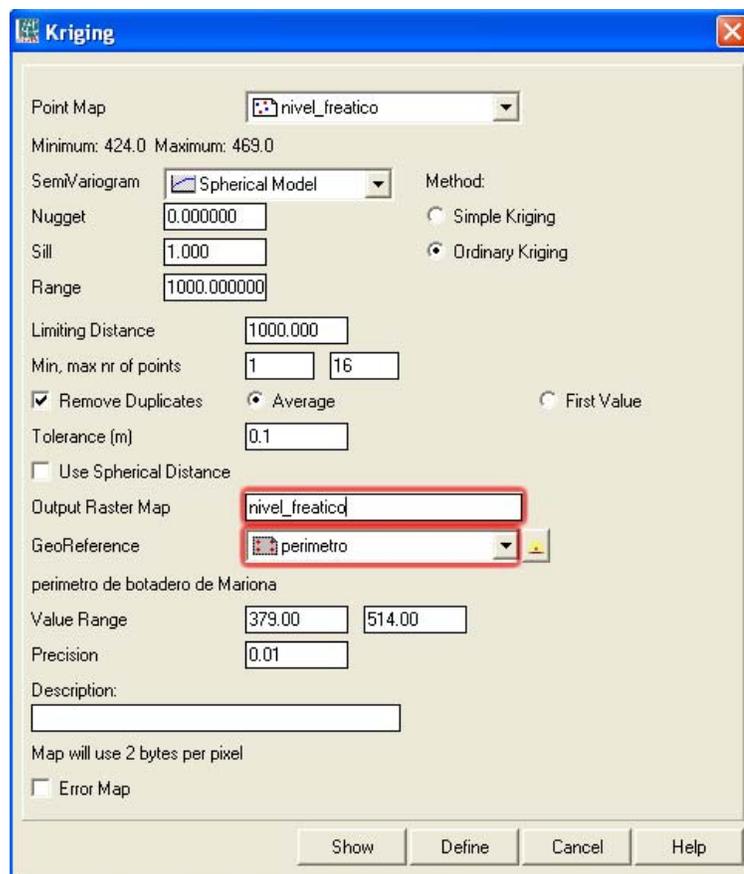


Figura 3.21 Ventana para interpolación por método Kriging en ILWIS 3.7

6. *Intersección de mapa raster de nivel freático con perímetro*; teniendo el mapa raster “nivel_freatico” procedimos a interceptar esta información con nuestro perímetro, para esto seguimos los siguientes pasos:

- 6.1. Clic derecho al mapa “nivel_freatico” dentro de la ventana principal y seleccionamos “Raster Operations”, “Cross” (ver Figura 3.22).
- 6.2. En “2nd Map” elegimos el mapa raster “perímetro”.
- 6.3. Dejamos activado la casilla “Ignore Undefs”, ya que ésta nos permite ignorar valores no definidos en el primer mapa de entrada en la tabla que es conjuntamente creada con nuestro mapa.
- 6.4. Activamos la casilla “Output Map”.
- 6.5. En “Output Map” y “Output Table” se escribió el nombre del mapa de salida y tabla de salida respectivamente, en este caso lo llamamos a ambos “cross_nf” ya que todavía debemos realizar otras operaciones para tener un mapa final.



Figura 3.22 Ventana para intersección de mapas raster en ILWIS 3.7

7. *Creación de mapa de atributos*; para tener el mapa de nivel freático deseado, debemos crear un mapa de atributos, ya que al revisar la información observamos que nos daba

combinada la información del perímetro y los niveles freáticos, los pasos a seguir fueron los siguientes:

- 7.1. Clic derecho dentro de la ventana principal al mapa “cross_nf” luego “Raster Operations”, “Attribute Map” (ver Figura 3.23).
- 7.2. Seccionamos en “Table” la tabla “cross_nf”.
- 7.3. En “Attribute” elegimos la columna “nivel_freatico”.
- 7.4. En “Output Raster Map” llamamos al mapa “botadero_nf”.
- 7.5. Por último dimos clic en “Show” y obtuvimos nuestro mapa de nivel freático.

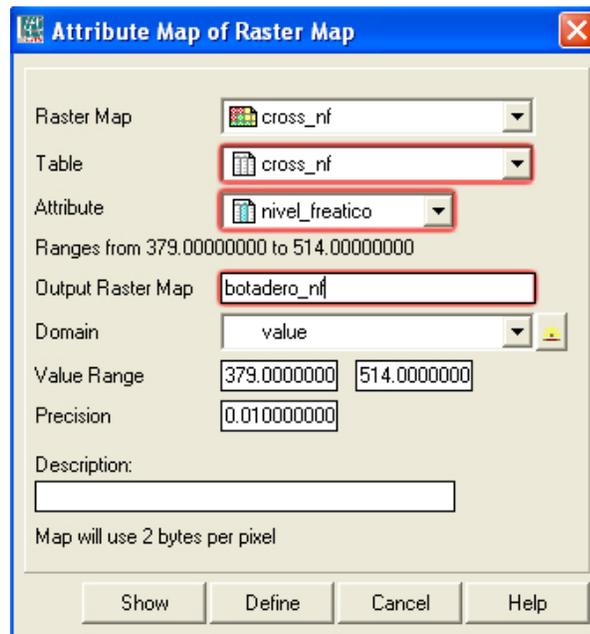


Figura 3.23 Ventana para creación de mapas de atributos raster en ILWIS 3.7

El proceso seguido para generar el MED fue el siguiente:

8. *Importación de curvas de nivel a cada 10 m.*, hicimos uso de la herramienta “Import”, donde elegimos el formato “Vector” y seleccionamos “Arc/View .SHP shape file” al mapa de salida lo llamamos “curvasdenivel”.

9. *Intersección de curvas de nivel con perímetro*, debido al tiempo que involucraba trabajar con todo el archivo curvas de nivel a cada 10 metros se decidió hacer un procedimiento que conllevará menos tiempo de análisis, por lo que el archivo “curvasdenivel” fue intersectado con el perímetro de nuestra zona en estudio, haciendo uso del procedimiento siguiente:
- 9.1. Clic derecho al archivo “curvasdenivel” y seleccionamos “Segment Operations”, “Intersection”
 - 9.2. Elegimos el perímetro de nuestra zona en “Second Input Map”
 - 9.3. Asignamos el nombre de nuestro nuevo documento en “Output Segment Map”, lo llamamos “curvas_perimetro” y seleccionamos “Show”.
10. *Creación de mapa de atributos de mapa de segmentos*, con el mapa generado anteriormente, creamos un mapa de atributos donde seleccionamos la columna de “elevaciones”, esto porque en el archivo los segmentos no están ordenados de acuerdo a su elevación sino que con descripciones.
11. *Interpolación de mapa de segmentos*, con el mapa de segmentos ordenado con sus respectivas elevaciones nos dispusimos a interpolar el mapa generado anteriormente, con el procedimiento expuesto en el parámetro D de GOD numeral 5, esto creó un archivo que abarcaba todo lo georeferenciado y no sólo el perímetro.
12. *Intersección de mapa interpolado de elevaciones con perímetro*, el mapa que se obtuvo de esta intersección fue llamado “cross_elevaciones”
13. *Creación de mapa raster de atributos*, la columna que usamos para generar este mapa fue “elevaciones” y lo llamamos “botadero_elevaciones”.
14. *Creación de mapa de profundidad de agua subterránea*; como lo que nos interesaba era la profundidad del agua y no su nivel freático, tuvimos que realizar la diferencia

entre la topografía de la zona (MED de nuestra zona de estudio) y el nivel freático, por lo que se aplicó en la barra de comandos de ILWIS la Ecuación 3.1.

$$\text{Botadero_profundidadagua} = \text{botadero_elevaciones} - \text{botadero_nf} \quad 3.1$$

15. Creación de dominio con rangos de profundidad de agua subterránea, el mapa anterior nos mostraba la profundidad del agua, pero era necesario ver dentro de qué intervalos de los establecidos en la Figura 2.13 se encontraban estos datos; para ello debimos crear un dominio que contuviese dichos intervalos, por lo que se realizó lo siguiente:

15.1. En la ventana principal nos dirigimos a “File”, “Create”, “Domain...”

15.2. En “Domain Name” llamamos a nuestro dominio “D”

15.3. El tipo de dominio que elegimos fue “Class”

15.4. Activamos la casilla “Group” (ver Figura 3.24)

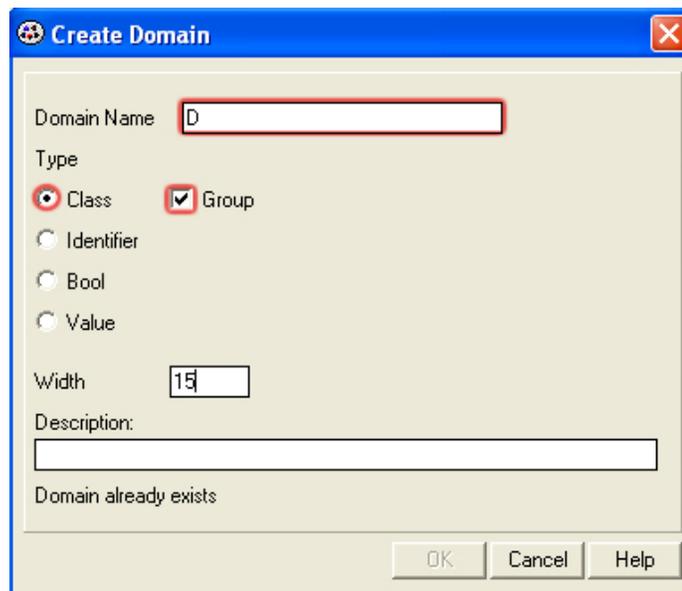


Figura 3.24 Ventana para creación de dominio en ILWIS 3.7

15.5. Dimos un clic en “OK” y nos dirigió a la ventana de edición de dominio (ver Figura 3.25)

- 15.6. Agregamos los intervalos de profundidad en “Edit”, “Add Item”; una vez ahí en “Upper Bound” seleccionamos el límite superior de nuestro intervalo y en “Name” el intervalo para identificarlo dentro del mapa.

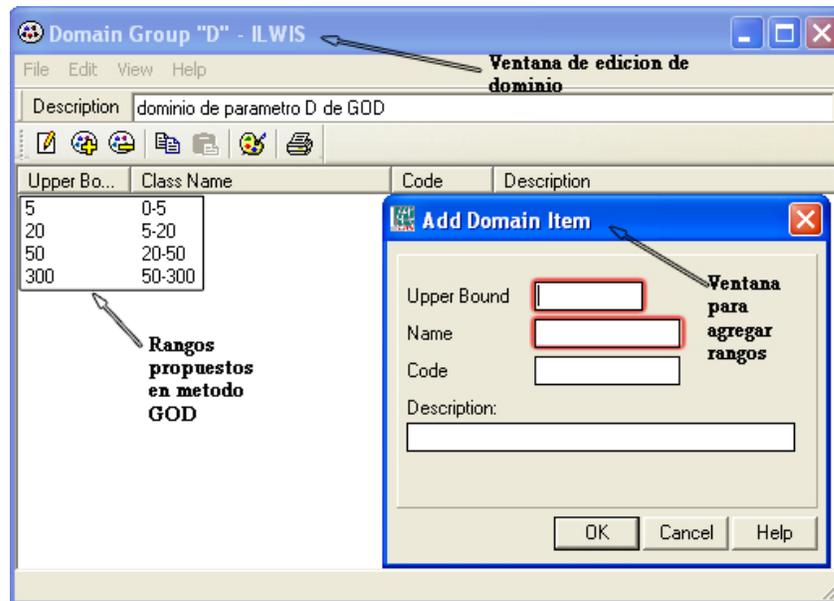


Figura 3.25 Ventana de edición de dominio en ILWIS 3.7

16. *Aplicación de rangos propuestos en método GOD a mapa de profundidad de agua subterránea.* Para aplicar el dominio creado a nuestro mapa de profundidad del agua subterránea se hizo lo siguiente:

- 16.1. Clic derecho en el mapa que deseamos modificar “Botadero_profundidadagua” y nos dirigimos a “Image Processing”, “Slicing”.
- 16.2. Seleccionamos en “Domain” el dominio creado “D”
- 16.3. En “Output Raster Map” llamamos a nuestro mapa “botadero_D”, y finalizamos eligiendo “Show”. (ver Figura 3.26)

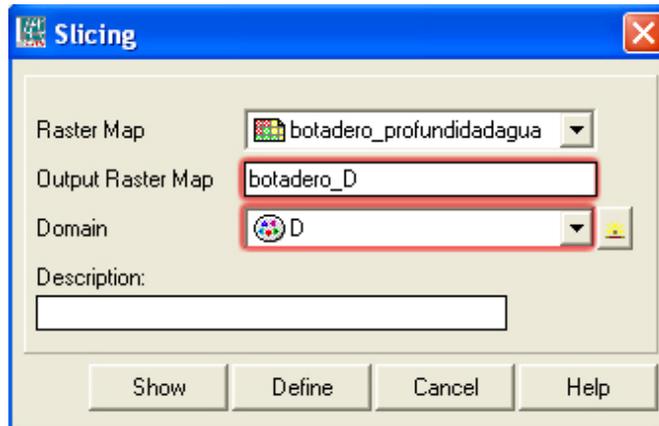


Figura 3.26 Ventana para aplicar dominio a mapa raster en ILWIS 3.7

17. *Creación de mapa de puntajes*; el último paso para la creación del mapa del parámetro “D” fue la aplicación de la Ecuación 3.2 en la barra de comandos de ILWIS.

$$D = \text{iff}(\text{botadero_D} = "0-5", 0.9, \text{iff}(\text{botadero_D} = "5-20", 0.8, \text{iff}(\text{botadero_D} = "20-50", 0.7, 0.6))) \quad 3.2$$

Al dar “enter” después de colocar la ecuación, se abrió una ventana donde se mostraba el tipo de dominio que contendría el mapa y otras características, como no nos interesaba cambiar los valores por defecto, solo dimos un clic en “OK” para ver nuestro mapa.

En la Figura 3.27 se muestra el mapa del parámetro “D” del método “GOD” con sus respectivos puntajes.

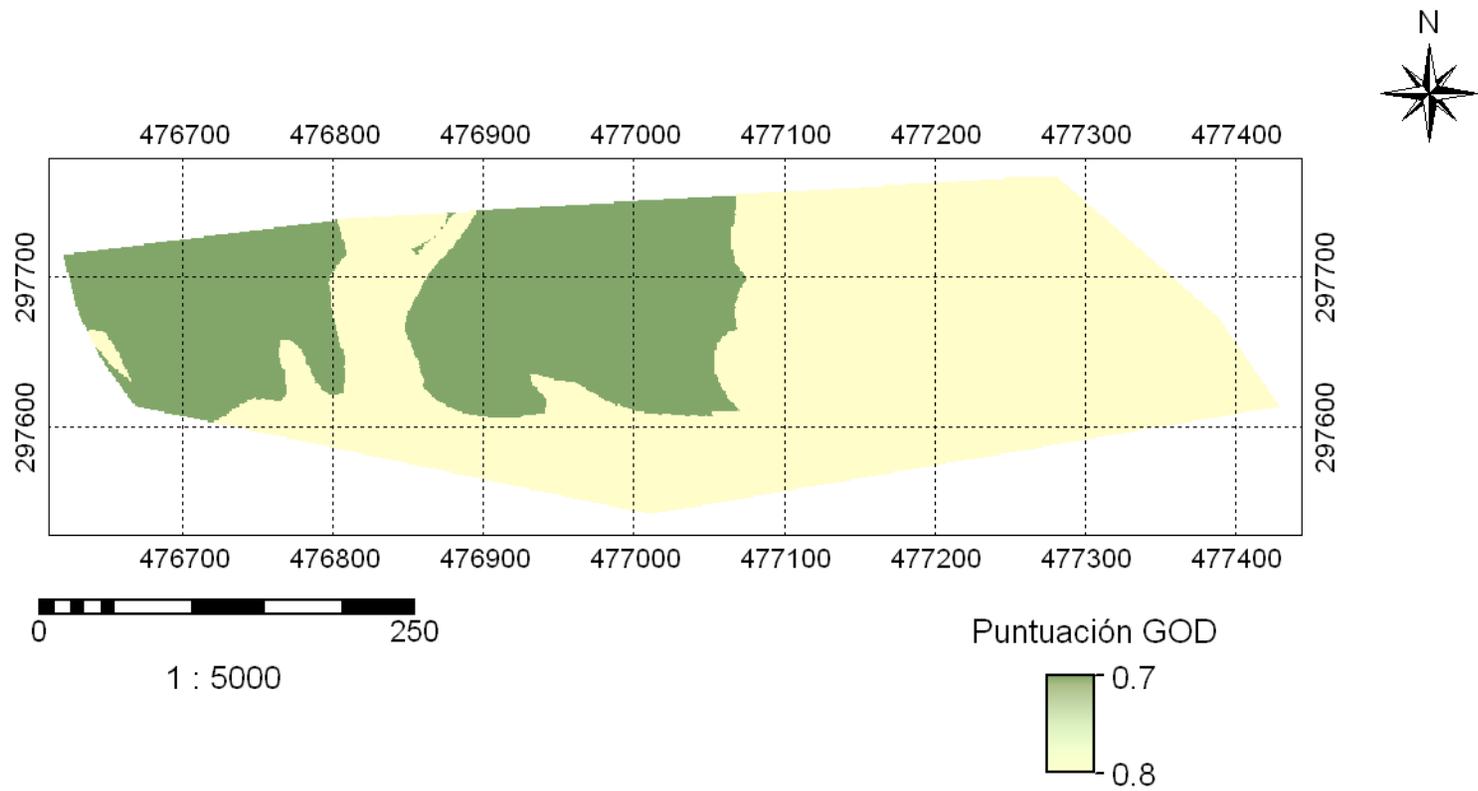


Figura 3.27 Mapa del parámetro D de GOD de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona

- **Aplicación de método GOD**

En este momento ya tenemos toda la información necesaria para crear el mapa de vulnerabilidad por el método GOD, para integrar toda esta información sustituiremos valores y asignaremos mapas a la Ecuación 2.16, el resumen de los puntajes y mapas a utilizar se presentan en la Tabla 3.5 a continuación.

Tabla 3.5 Resumen de puntajes y mapas a utilizar en método GOD

Parámetro	Puntaje o mapa
Tipo de acuífero (G)	0.6
Litología de la cobertura (O)	0.8
Profundidad del acuífero (D)	Mapa de parámetro D (Figura 3.27)

La operación a aplicar en ILWIS es la que se muestra en la Ecuación 3.3, la cual se digitó en la barra de comandos.

$$GOD = 0.6 * 0.8 * D \quad 3.3$$

Para un mejor entendimiento de los resultados obtenidos al aplicar la Ecuación 3.3, usamos la función “slicing”, en esta ocasión creamos un dominio con los rangos propuestos para vulnerabilidad de la Tabla 2.4, sólo que en vez de colocar en “Name” el rango colocamos el nivel de vulnerabilidad que teníamos. El proceso para crear un dominio ya ha sido descrito anteriormente por lo que creamos uno que llamamos “rangos_GOD”, con los rangos propuestos por el método para clasificar la vulnerabilidad; entonces usamos este dominio en el mapa “GOD” y llamamos a este nuevo mapa “Vulnerabilidad_GOD”.

3.2.3. Presentación de mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas

En la Figura 3.28 se presenta el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método GOD.

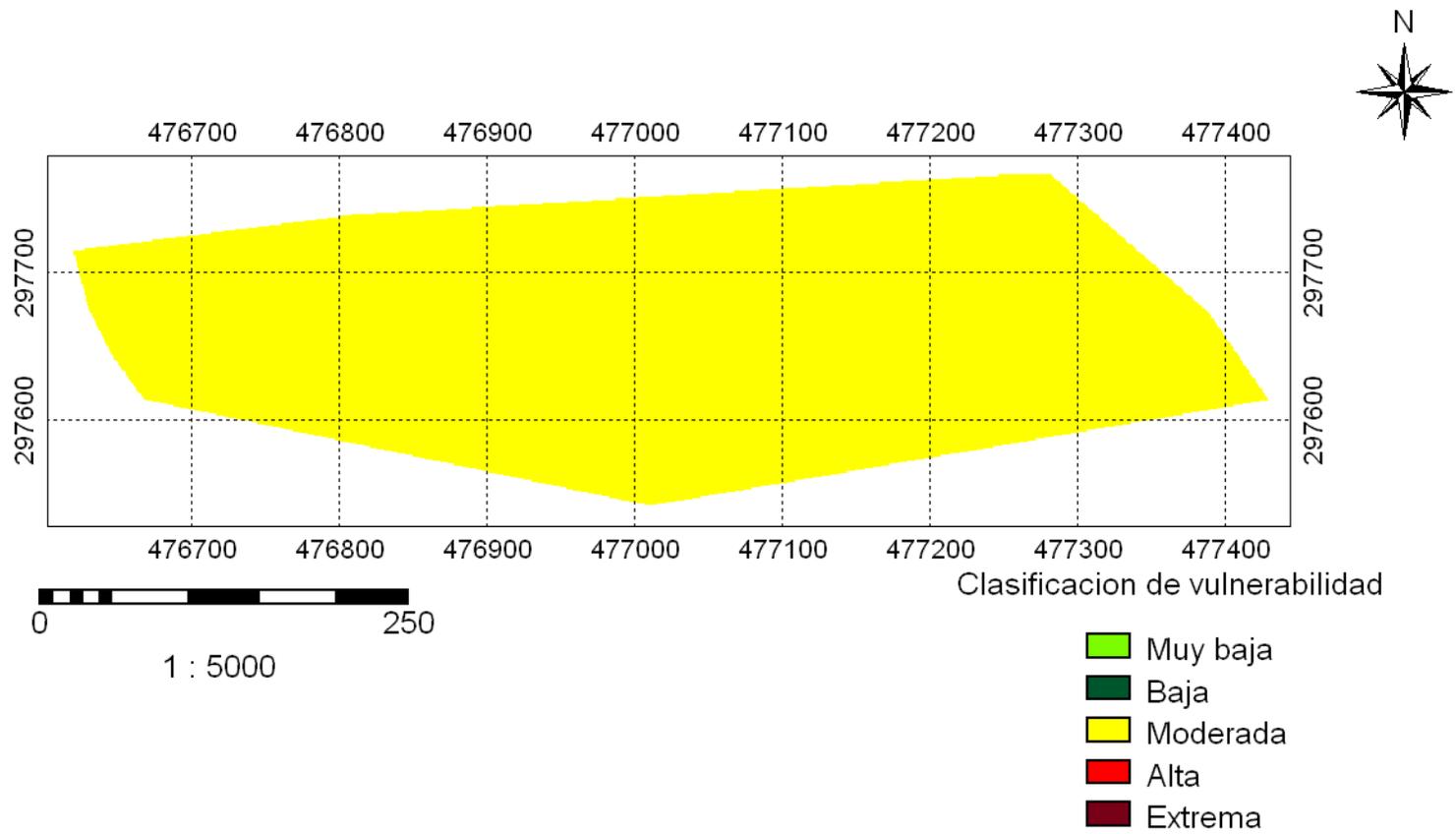


Figura 3.28 Mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Resultado de la aplicación del método GOD

3.3. *Elaboración del mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas con la aplicación del método DRASTIC*

3.3.1. Presentación de información de parámetros DRASTIC

3.3.1.1. Profundidad del acuífero (D = Depth to water)

Este parámetro es igual al parámetro “D” del método GOD que ya ha sido mencionado anteriormente, y el origen de la información es la misma, cambiando solamente el procesamiento de datos por la diferente manera de evaluar los rangos de profundidades al nivel freático el método DRASTIC, lo cual se hace en base a la Tabla 2.4.

3.3.1.2. Recarga neta (R = Recharge)

Esta información fue tomada de un informe elaborado por la OPAMSS en el año 2007 denominado “Mapa y Estudio de Recarga Acuífera del Área Metropolitana de San Salvador, Zona Prioritaria No 1: Faldas del Volcán de San Salvador – Cuenca del Río Acelhuate”, la información de recarga neta de la cuenca de Río Acelhuate se muestra en la Figura 3.29.

Para aplicarlo a nuestro caso primero fue necesario referenciar geográficamente el mapa de recarga de Río Acelhuate y digitalizarlo. Se estableció el valor de este parámetro de acuerdo a la Tabla 2.5, en la cual dependiendo de en qué rango esté el valor de recarga, así será asignado el puntaje, quedando como se muestra en la Tabla 3.6.

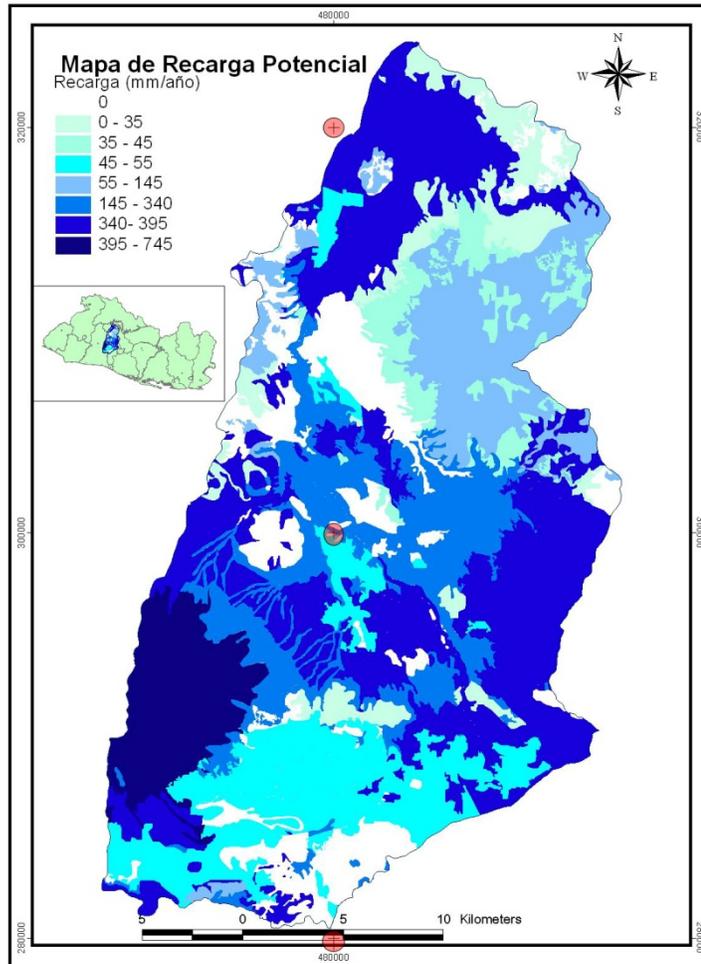


Figura 3.29 Mapa de recarga potencial de la cuenca del río Acelhuate

Fuente: Beatriz Gil. Mapa y estudio de Recarga Acuifera del Area Metropolitana de San Salvador, zona prioritaria No 1: Faldas del Volcan de San Salvador-Cuenca del Rio Acelhuate. 2007

Tabla 3.6 Valores de recarga de la zona de estudio

Rango (mm/año)		Rango (m/día)		Valor (Rr)
145	340	0.00039726	0.000931507	8
340	395	0.000931507	0.001082192	9

3.3.1.3. Tipo de acuífero (A = Acuífero media)

Este parámetro se refiere a la litología que constituye el acuífero, pero no se logró obtener información directa de pozos; sin embargo se tiene el perfil geoelectrico que ya ha sido mencionado (ver Figura 3.11). Conociendo que el acuífero esta formado por

piroclástitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas, las cuales se conocen son de origen volcánico, se le asignó un valor de 9.0 de calificación, tomando en cuenta lo que dice la Tabla 2.6, siendo el valor típico que recomienda la metodología para este tipo de medio acuífero.

3.3.1.4. Tipo de suelo (S = Soil media)

Este parámetro se refiere al tipo de suelo presente en el lugar y se determinó a partir de la ubicación de nuestra zona de estudio en el mapa pedológico de nuestro país, el cual es un archivo ArcView Shape que consta de un mapa de polígonos (mapa vectorial) y una tabla que nos permite conocer la información sobre cada uno de los polígonos que comprende el mapa. Nuestra zona de estudio presenta dos tipos de suelo que se detallan en Tabla 3.7 junto a su calificación respectiva. Para este tipo de información que no se encuentra su puntuación en la Tabla 2.7, pero según sus características y relacionando la información con la tabla anteriormente mencionada se establecieron los siguientes puntajes que se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Tipos de suelo presentes en la zona de estudio

Tipo de suelo	Características	Calificación (Sr)
Latosoles arcillosos rojizos	Son suelos profundos y fuertemente desarrollados, derivados en su mayoría de materiales volcánicos no consolidados. El suelo es franco arcilloso y sub-suelo arcilloso de colores rojizos, usualmente sin piedras	3
Andisoles	Suelo originados de cenizas volcánicas, por lo general muy profundos y de textura medias a mediamente gruesas, tienen buen drenaje	9

3.3.1.5. Topografía (T = Topography)

La información con la que se contó para elaborar el mapa de este parámetro es el archivo ArcView Shape de curvas de nivel a cada diez metros, el cual consta de un mapa de

segmentos y una tabla donde se indica información sobre cada curva, como su longitud y elevación. Su evaluación se hizo en base a la Tabla 2.8.

3.3.1.6. Impacto del tipo de Zona Vadosa (I = Impact of the Vadose Zone Media)

Este parámetro es similar al parámetro “O” del método GOD, que se refiere al estrato de la zona vadosa, la cual está formada por piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas subordinadas. Esta información se conoció en base al sondeo geoelectrico realizado en el trabajo de graduación “Evaluación Geoelectrica del Antiguo Botadero de Residuos Sólidos Urbanos de Mariona”, este perfil geoelectrico se muestra en la Figura 3.11.

De la Tabla 2.9 se estableció una nota de “9.0”, ya que este tipo de litología es volcánica y está presente en toda la zona de estudio.

3.3.1.7. Conductividad Hidráulica (C = Hydraulic Conductivity of the aquifer)

Respecto a este parámetro no se obtuvo un dato específico de la zona, sin embargo se relacionó la información con la de un lugar cercano, de la cual ya se conocían los datos de transmisividad promedio de los pozos. Para nuestro caso contamos con el estudio “Caracterización de los riesgos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos – Directrices para la ordenación territorial de Nejapa” presentado por Diana de León en agosto del 2003, que contiene el valor de transmisividad medio de todos los pozos inventariados por Esquivel en el 2000, en los estudios: “Estudio de factibilidad técnica, económica y social para el proyecto: Mejoramiento y uso racional del río San Antonio. Municipio de Nejapa, Departamento de San Salvador” y “Diagnóstico Detallado del Problema: Mejoramiento y Uso Racional del Río San Antonio”; en el que se inventariaron puntos de agua de distintos años (no medidos en los estudios), siendo la transmisividad promedio de 586 m²/día y que partiendo de este dato y considerando un espesor promedio del acuífero de nuestra zona, pudimos conocer la conductividad hidráulica. La determinación de este parámetro se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Determinación de la conductividad hidráulica de la zona de estudio

Datos	Fórmula	Conductividad (K)
Espesor medio del acuífero (b)=10.0 m	K=T/b	58.6 m/día
Transmisividad (T)= 586.0 m/día		

El dato de conductividad hidráulica será el mismo para toda la zona de estudio y que según la Tabla 2.10 se le asigna un valor de puntuación de 8.

Es de mencionar que estos datos de los cuales se dedujo la conductividad hidráulica son aproximados, con la salvedad que para asignarle una calificación de 8, el valor de este podría estar en el rango de 41 a 82 m/día, tal como lo establece la Tabla 2.10.

3.3.2. Procesamiento de información

A continuación se describe el proceso realizado para crear los mapas de cada una de las variables del método DRASTIC, partiendo de que ya se tienen creado los mapas de puntos, segmentos, polígono y raster de la zona de estudio, como parte del procesamiento de la información para el método GOD.

- **Parámetro “D” de DRASTIC**

El procedimiento seguido para la obtención de este parámetro fue igual al realizado en la obtención del parámetro D del método GOD, lo que cambió son los intervalos usados para establecer el puntaje, para lo cual se realizó un nuevo dominio que llamamos “Dr”, siendo este dominio aplicado al mapa “botadero_profundidadagua” mediante la función “Slicing”. Para elaborar el mapa final del parámetro hicimos uso de la Ecuación 3.4.

$$Dr = \text{iff}(\text{botadero_Dr} < 0 - 15, 10, \text{iff}(\text{botadero_Dr} < 1.5 - 5, 9, \text{iff}(\text{botadero_Dr} < 5 - 10, 7, \text{iff}(\text{botadero_Dr} < 10 - 20, 5, \text{iff}(\text{botadero_Dr} < 30 - 20, 2, 1)))))) \quad 3.4$$

En la Figura 3.30 se muestra el mapa del parámetro D del método DRASTIC con sus respectivos puntajes.

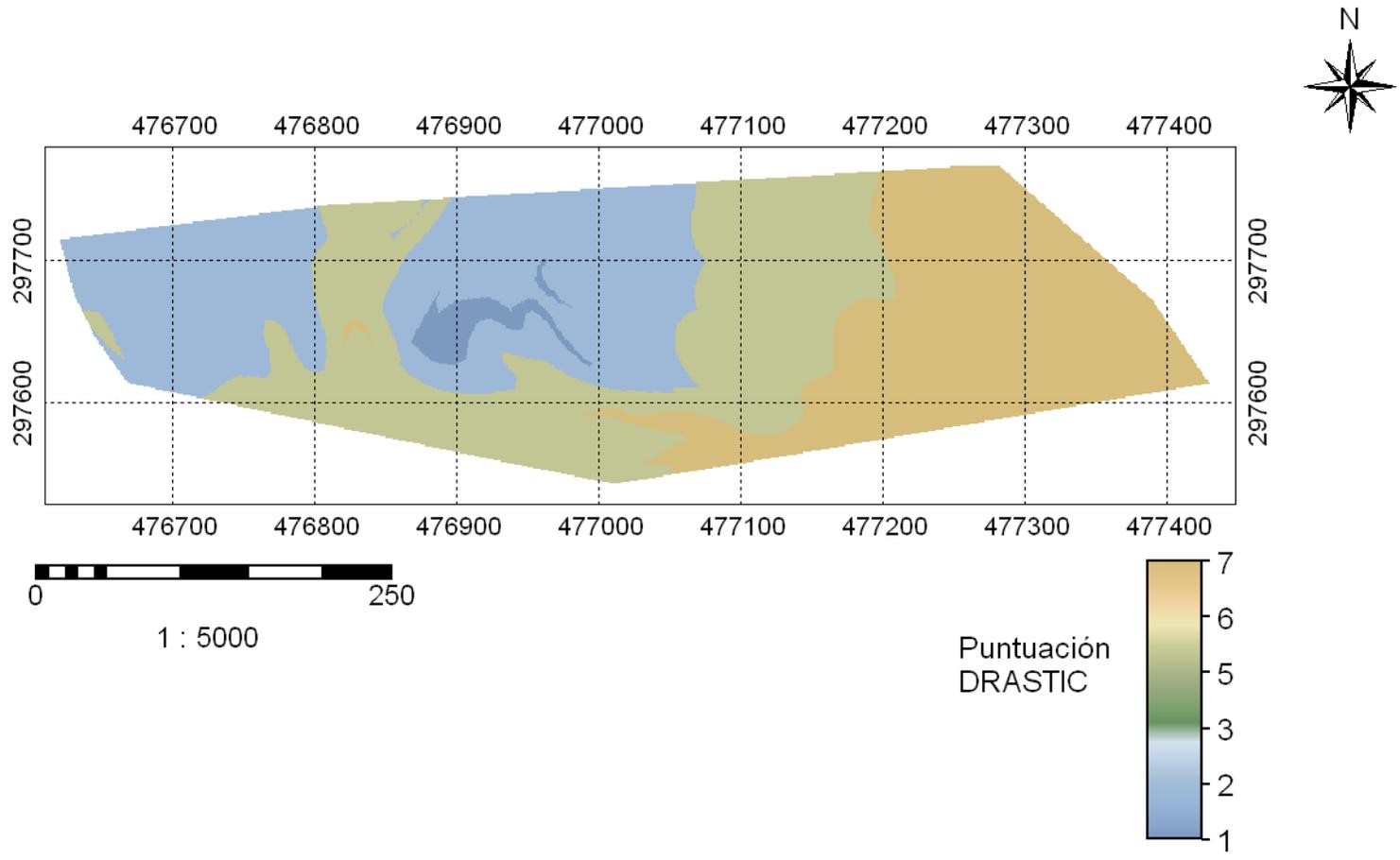


Figura 3.30 Mapa del parámetro D de DRASTIC de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona

- **Parámetro “R” de DRASTIC**

Como ya se dijo anteriormente, se hizo uso de un mapa en formato de imagen; por lo que fue necesario hacer una digitalización en pantalla para manipular la información.

Para la elaboración del mapa de este parámetro se aplicaron los siguientes pasos:

1. *Importación de imagen de recarga neta*, importamos la imagen haciendo uso de la función “Import” mencionadas antes en la delimitación del perímetro numeral 3, pero buscamos la pestaña “Raster” y se importó mediante el formato Tagged Image File (.TIF), este mapa quedó representado como un mapa raster llamado “recarga_potencial”
2. *Georeferenciación de imagen*, el mapa importado no se encontraba referenciado, por lo que se realizó lo siguiente:
 - 2.1. Ingresamos al mapa desde la ventana principal de ILWIS.
 - 2.2. En la ventana de configuración de visualización del mapa, se dejó todas las opciones por defecto.
 - 2.3. Nos dirigimos a “File”, “Create”, “GeoReference” (ver Figura 3.31).

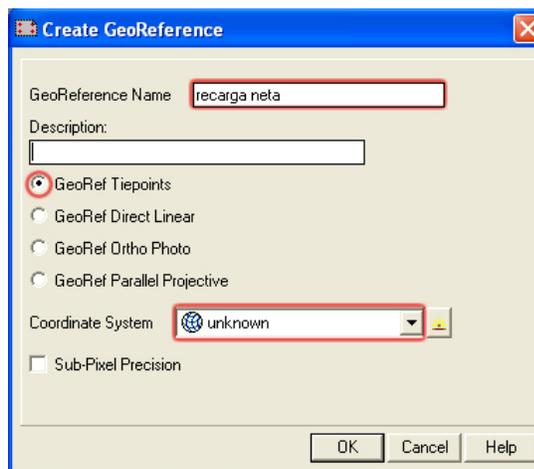


Figura 3.31 Ventana para crear georeferencia de una imagen en ILWIS 3.7

- 2.4. En “GeoReference Name” llamamos a la nueva georeferencia “recarga potencial”
- 2.5. Elegimos la opción “GeoRef Tiepoints”, ya que consiste en un método de referenciar mediante la ubicación de puntos dentro de la imagen, asignándoles posteriormente sus coordenadas; para las otras alternativas fue necesario contar con el MED (GeoRef Direct Linear), usado para ortofotografías (GeoRef Ortho Photo) y para fotografías (GeoRef Parallel Projective).
- 2.6. En Coordinate System se eligió “unkown”, después “OK”, entonces el programa nos dirigió a la ventana para editar georeferenciaciones como se muestra en la Figura 3.32.
- 2.7. En el editor de georeferencias seleccionamos el método “Conformal”, este permitió referenciar las imágenes de forma debida con solo tres puntos, para otros métodos se necesita mayor información de la que proporciona el mapa con que contamos.
- 2.8. Elegimos el icono que se indica en Figura 3.32 y dimos un clic en uno de los puntos que conocíamos las coordenadas dentro de la imagen, cuando dimos ese clic se desplegó una ventana donde apareció la información de la columna y fila donde se encontraba el punto introducido y al lado colocamos la coordenada X y Y que correspondía a dicho punto, esto se hizo en los otros dos puntos que se tenían.
- 2.9. Para finalizar salimos del editor buscando en el menú “File”, “Exit Editor” y la imagen quedó referenciada.

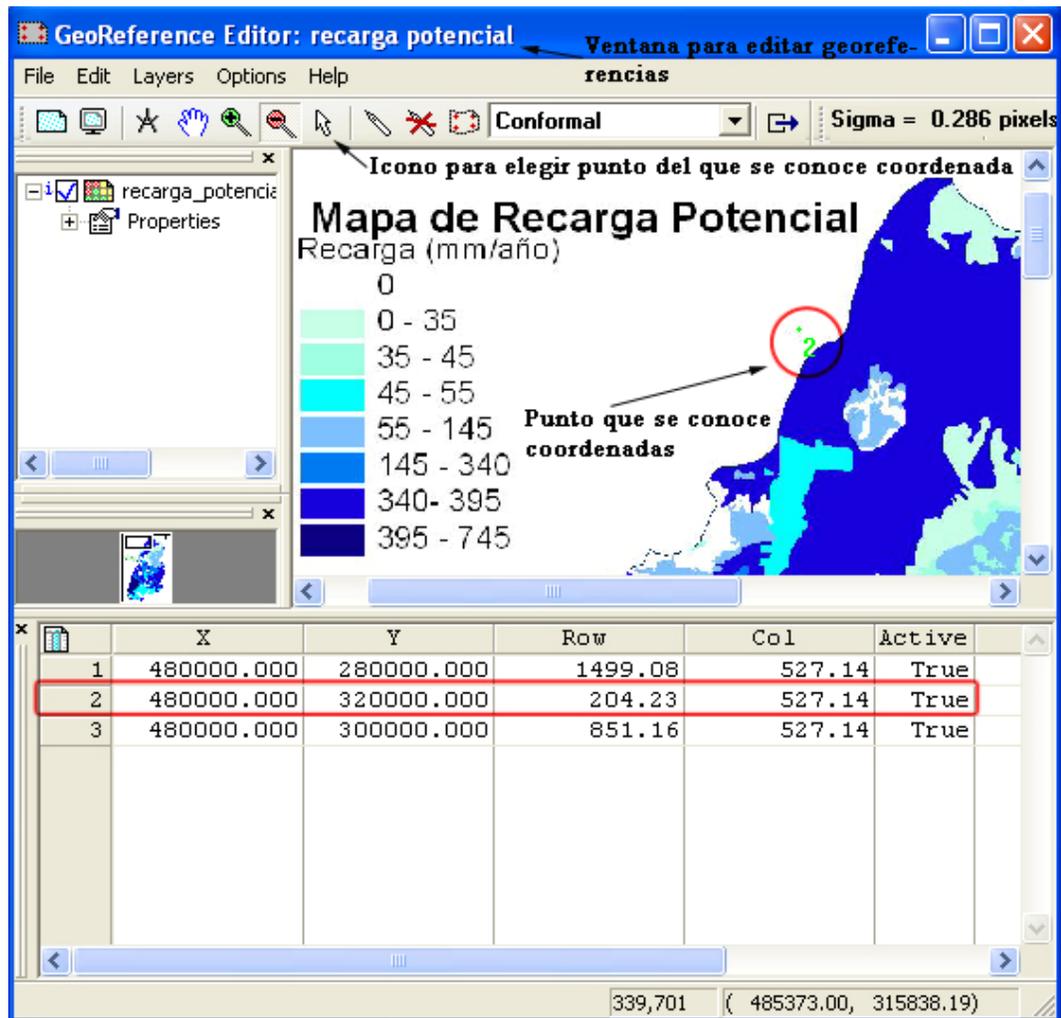


Figura 3.32 Ventana de editor de georeferenciaciones en ILWIS 3.7

3. *Creación de dominio con rangos de recarga neta*; se creó un dominio “Class” con los diferentes intervalos que nos indicaba el mapa de recarga para tenerlo disponible cuando se fuera digitalizando, a este lo llamamos “recarga neta”.
4. *Digitalización del mapa de recarga neta*; siendo tantos los polígonos que deberían digitalizarse se tomó la decisión de elegir aquellos que intersectaran con el antiguo botadero, y realizamos el siguiente proceso:
 - 4.1. Activamos la ventana para visualizar el mapa de recarga

- 4.2. Nos dirigimos a “File”, “Create”, “Segment Map” (ver Figura 3.33)
- 4.3. En “Map Name” se nombró al mapa de segmentos como “segment_recarga”
- 4.4. No cambiamos las coordenadas que se indican en la ventana
- 4.5. En dominio elegimos “recarga_neta” y después “OK”. Se abrió la ventana de edición de mapas de segmentos en la que visualizamos el mapa.
- 4.6. Para dibujar los segmentos se usó “Edit”, “User mode”
- 4.7. Apareció una ventana para elegir el código del segmento que deseabamos digitar, se pudo elegir de la lista que ingresamos cuando se hizo el dominio. Estos segmentos se podían cambiar posteriormente, pero se recomienda ir trabajando de forma ordenada para evitar confusiones posteriores
- 4.8. Definimos el contorno de los polígonos, clickeando por cada cambio de dirección para introducir líneas o también de modo continuo manteniendo el clic izquierdo y desplazándonos para ir dibujando los contornos de los polígonos, cuando ya se terminó de dibujar el segmento sólo se dió un doble clic. Es recomendable que en dado caso nos equivocamos a la hora de digitalizar, no se interrumpa el dibujo de segmentos, pues se debe proseguir y posteriormente se puede modificar el error en el menú “Edit”, “Move Points”.

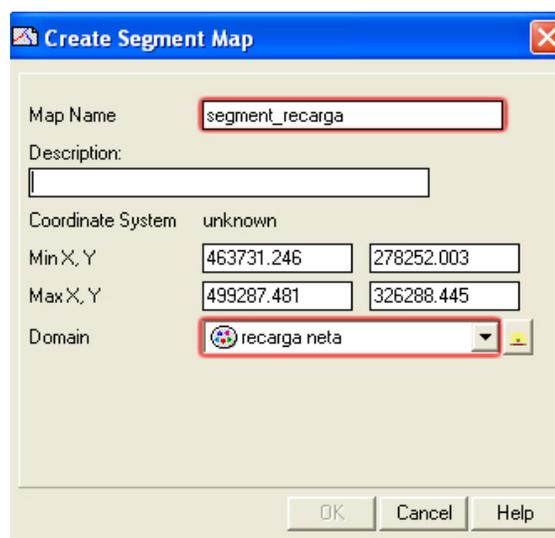


Figura 3.33 Ventana para creación de mapa de segmentos en ILWIS 3.7

- 4.9. Con los segmentos realizados debimos hacer una serie de comprobaciones para evitar errores a la hora de crear los polígonos, estas comprobaciones se encontraban dentro del menú “File”, “Check Segment” y se describen en Tabla 3.9; si teníamos algún error el programa nos indicaba donde estaba ese error.

Tabla 3.9 Comprobaciones a realizar para verificar mapa de segmentos en ILWIS

Comprobación	Descripción	¿Cuándo usar?
Self Overlap	Comprueba si los segmentos se solapan en parte y se cortan ellos mismos.	Al querer generar mapas de polígonos
Dead Ends	Comprueba si los segmentos tienen ida sin retorno y si los nodos están conectados correctamente a otros nodos. También se comprueba si los segmentos se superponen en parte.	
Intersections	Comprueba si los diferentes segmentos se cruzan entre sí sin un nodo. También se comprueba si los segmentos se superponen en parte.	Esta comprobación se debe utilizar cuando se desea poligonizar segmentos y para asegurarse de que las curvas de nivel no se cruzan entre sí.
Code Consistency	Comprueba si los segmentos que están conectados entre sí por un nodo tienen el mismo valor. Esta opción está diseñada para comprobar si por ejemplo una línea de contorno, que consta de varios segmentos consecutivos, tiene un código de altura.	No es necesario usar al crear mapas de polígonos
For non-topo Polygons	Comprueba si cada segmento tiene sólo un nodo que actúa tanto como el nodo de comienzo y nodo final.	Cuando se ha importado archivos vectoriales (por ejemplo DXF) en ILWIS antes, y se desea poligonizar el mapa segmento que es el resultado de la importación.

- 4.10. Nos dirigimos a “File”, “Polygonize” (ver Figura 3.34).
- 4.11. Activamos la casilla “Topology” ya que es una herramienta que debe estar activada cuando se ha realizado una digitalización en ILWIS, en caso de que el archivo hubiera tenido origen por ejemplo de Autocad no se debía activar esta casilla.
- 4.12. En “Polygon Codes” elegimos “Domain” y buscamos el dominio “recarga neta”.
- 4.13. En Output Polygon Map, llamamos nuestro mapa “polygon_recarga”.

- 4.14. Activamos la casilla “Edit” para verificar que nuestro mapa se generará de forma correcta, y por último “OK”.
- 4.15. En la ventana de edición de mapa de polígonos, verificamos que todo estuviera bien y salimos del editor, “file”, “Exit Editor”.

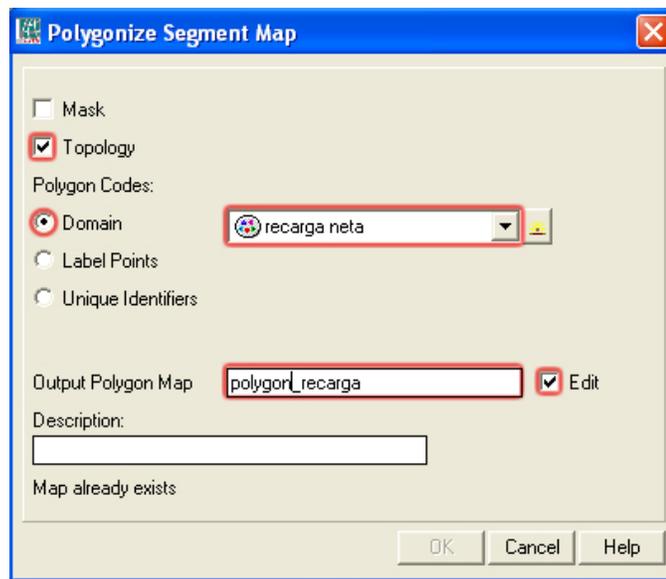


Figura 3.34 Ventana para poligonizar segmentos en ILWIS 3.7
Fuente: Elaboración propia.

5. *Creación de mapa raster de polígonos digitalizados*; el proceso es similar al de delimitación de zona de estudio numeral 5, elegimos el mapa “polygon_recarga” y la georeferenciación “perímetro”, y llamamos a este nuevo mapa raster “recarga”.
6. *Intersección de mapa rasterizado con perímetro*; esto lo hicimos por medio de la función “Cross”, y a la nueva tabla y mapa lo llamamos “cross_recarga”, ya que se sabía de procedimientos anteriores que generaríamos un mapa de atributos, donde la columna de atributos que nos interesaba es “recarga”, y el mapa fue llamado “botadero_recarga”.
7. *Creación de mapa de puntajes*; los últimos pasos a realizar para la obtención del mapa final fue la aplicación de la Ecuación 3.5 en la barra de comandos de ILWIS:

$$Rr = \text{iff}(\text{botadero_recarga} = "145 - 340", 8,9)$$

3.5

En la Figura 3.35 se muestra el mapa del parámetro R del método DRASTIC con sus respectivos puntajes.

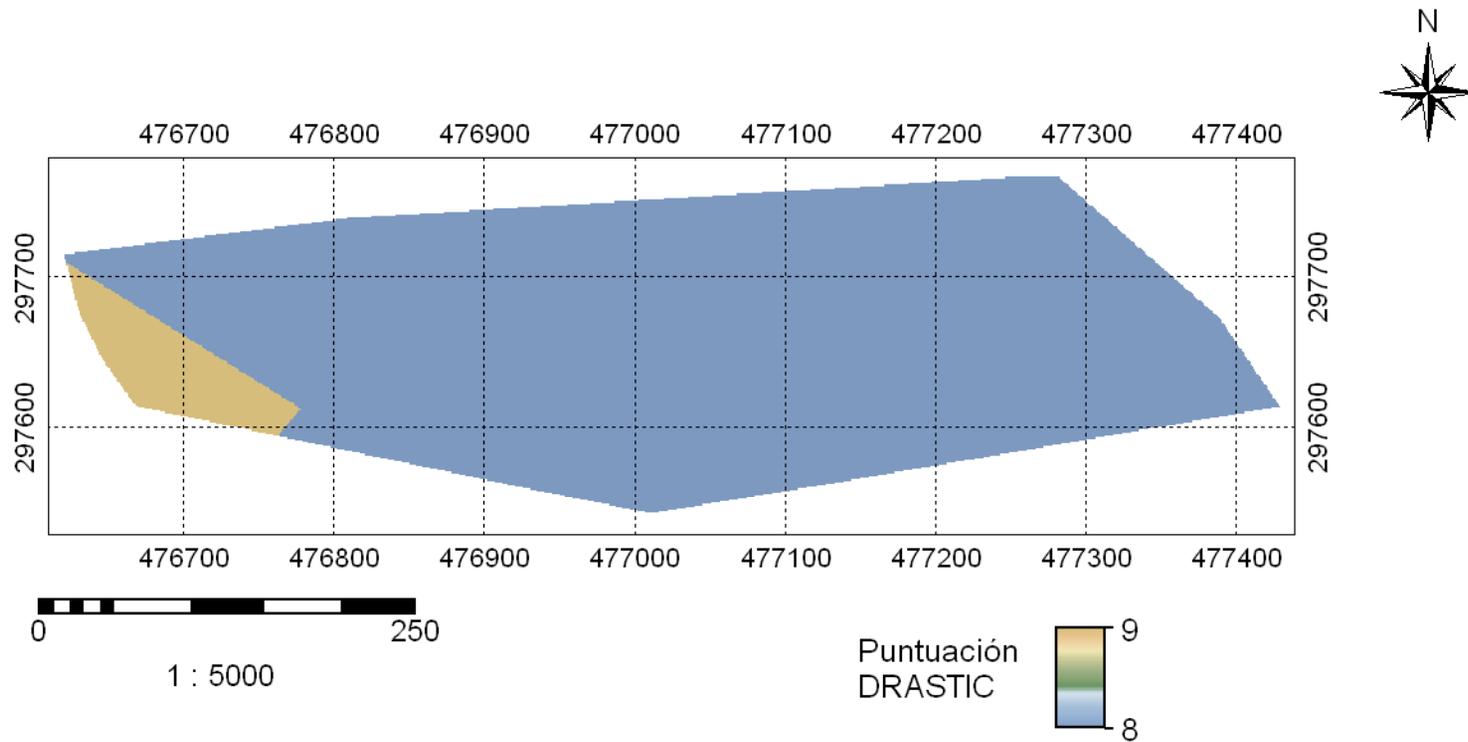


Figura 3.35 Mapa del parámetro R de DRASTIC de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona

- **Parámetro “A” de DRASTIC**

Respecto a este parámetro no se hizo procesamiento para crear el mapa, ya que la litología que constituye el acuífero es la misma en toda la zona de estudio y por ello tendría una sola calificación, por lo que no tenía sentido presentarlo en un mapa ya que sólo se representaría un único valor en él.

- **Parámetro “S” de DRASTIC**

El procedimiento realizado para dicho parámetro fue el siguiente:

1. *Importación de mapa pedológico*; se importó el mapa según lo explicado en parámetro “D” de GOD numeral 8 y lo titulamos “pedológico”.
2. *Creación de mapa raster de mapa polígonos de pedología de El Salvador*; este proceso se realizó según lo explicado en parámetro “R” de DRASTIC numeral 5, pero en este caso elegimos como nuestra georeferenciación el archivo “perimetro”, porque sólo nos interesa analizar nuestra área de estudio, además el programa no puede realizar operaciones entre mapas de diferente georeferenciación (el mapa raster creado de esta forma fue llamado “pedologico”).
3. *Creación de mapa de atributos*; el mapa generado anteriormente manejaba la información de acuerdo a identificadores de polígonos, a nosotros nos interesaba que estuviera de acuerdo a la clase de suelo, por lo cual usamos los códigos numéricos de la Tabla 3.10, si hubiera sido manejado como un mapa con dominio “class” asignaríamos calificaciones de acuerdo al nombre del tipo de suelo, pero al ser un mapa con dominio “ID” lo más fácil fue usar los códigos propuestos. El proceso de crear mapas de atributos ya ha sido explicado antes; siendo la tabla a elegir “pedologico” y la columna que nos interesa “CLASE”, a este mapa lo nombramos “suelos”.

Tabla 3.10 Clases de suelos según mapa pedológico de El Salvador

CLASE	TIPO DE SUELO
1	ALUVIALES
2	GRUMOSOLES
3	ANDISOLES
4	LATOSOLES ARCILLO ROJIZOS
5	REGOSOLES Y HALOMORFICOS
6	LITOSOLES
7	LATOSOLES ARCILLOSOS ACIDOS
8	AREA URBANA

4. *Intersección de mapa de tipos de suelos con perímetro*; se usó la función “Cross” para realizar tal intersección, a los mapas y tabla que se generaron los llamamos “cross_suelos” y como ya ha sido explicado anteriormente, creamos un mapa de atributos para obtener un mapa con los códigos que deseamos; elegimos dentro de la ventana de mapas de atributos la tabla “cross_suelos” y el atributo “suelos” y llamamos a este mapa “botadero_suelo”.

5. *Creación de mapa de puntajes*, con el mapa de suelos finalmente terminado procedimos a asignar los puntajes respectivos a cada intervalo haciendo uso de la Ecuación 3.6.

$$Sr = \text{iff}(\text{INRANGE}(\text{botadero_suelo}, 4, 4), 3, 9) \quad 3.6$$

El uso de la función “INRANGE” es porque no se realizó un dominio “class” para aplicarlo a través de la función “Slicing” al mapa “botadero_suelo”, como se había hecho en anteriores mapas.

En la Figura 3.36 se muestra el mapa del parámetro S del método DRASTIC con sus respectivos puntajes

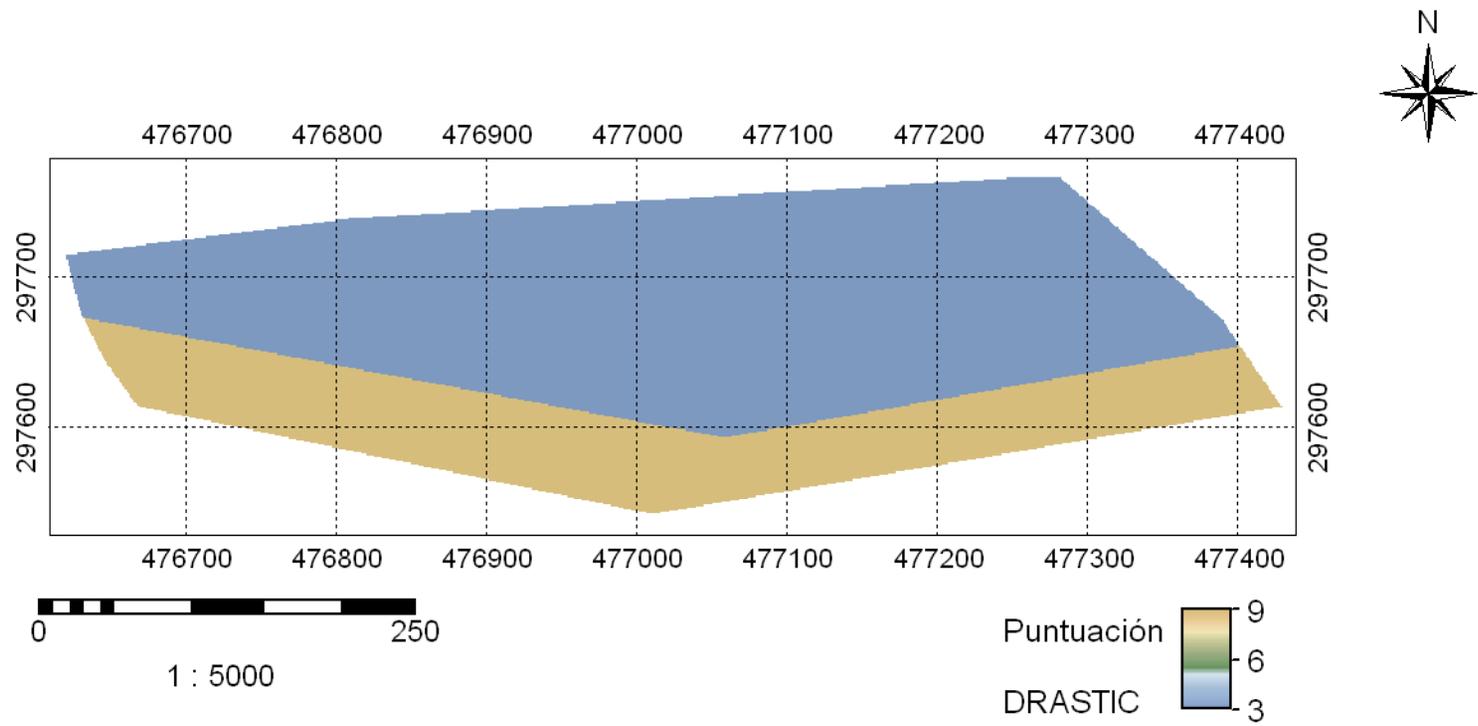


Figura 3.36 Mapa de parámetro S de DRASTIC de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona

- **Parámetro “T” de DRASTIC**

Para este parámetro debíamos recordar el proceso realizado en el parámetro “D” de GOD en los numerales del 8 al 13, por lo que el MED se identifico bajo el nombre de “botadero_elevaciones”; a partir de aquí se aplicaron los siguientes pasos:

1. *Cálculo del gradiente de distancia horizontal (DEM_dx) y el gradiente de distancia vertical (DEM_dy);* para esto se escribió en la barra de comandos de ILWIS las Ecuaciones 3.7 y 3.8.

$$DEM_dx = MapFilter(botadero_elevaciones.mpr, dfdx.fil) \quad 3.7$$

$$DEM_dy = MapFilter(botadero_elevaciones.mpr, dfdy.fil) \quad 3.8$$

2. *Creación del mapa de pendientes por porcentaje;* se aplicó en la barra de comandos la Ecuación 3.9 siguiente:

$$Pendiente = 100 * HYP(DEM_dx, DEM_dy) / PIXSIZE(botadero_elevaciones) \quad 3.9$$

3. *Creación de dominio con rangos propuestos para parámetro;* el proceso de crear un dominio ya ha sido explicado antes y de donde se tomaran los datos para éste también, por lo que el dominio fue llamado “pendiente”
4. *Aplicación de rangos propuestos en parámetro a mapa de pendientes;* usamos la función “Slicing” para el dominio antes dicho, el mapa resultado del uso de esta función lo llamamos “mapa_pendientes”
5. *Intersección de mapa de pendientes con perímetro;* usamos la herramienta “Cross” para realizar la intersección, y al resultado lo nombramos “pporcentaje”; creamos un mapa de atributos haciendo uso de la columna “mapa_pendientes” y llamamos a este ultimo mapa “botadero_pendientes”.

6. *Creación de mapa de puntajes*; con el mapa de pendientes finalmente terminado procedimos a asignar los puntajes respectivos a cada intervalo haciendo uso de la Ecuación 3.10.

$$Tr = \text{iff}(\text{botadero_pendientes} = "0-2", 10, \text{iff}(\text{botadero_pendientes} = "2-6", 9, \text{iff}(\text{botadero_pendientes} = "6-12", 5, \text{iff}(\text{botadero_pendientes} = "12-18", 3, 1)))) \quad 3.10$$

En la Figura 3.37 se muestra el mapa del parámetro T del método DRASTIC con sus respectivos puntajes.

- **Parámetro “T” de DRASTIC**

No se hará procesamiento para crear el mapa, ya que se tiene un solo tipo de material, por lo cual este parámetro tendría una sola calificación en toda la zona de estudio.

- **Parámetro “C” de DRASTIC**

Este parámetro tuvo un solo valor y por ello una sola calificación en toda la zona de estudio, por lo que también no se presenta su mapa correspondiente.

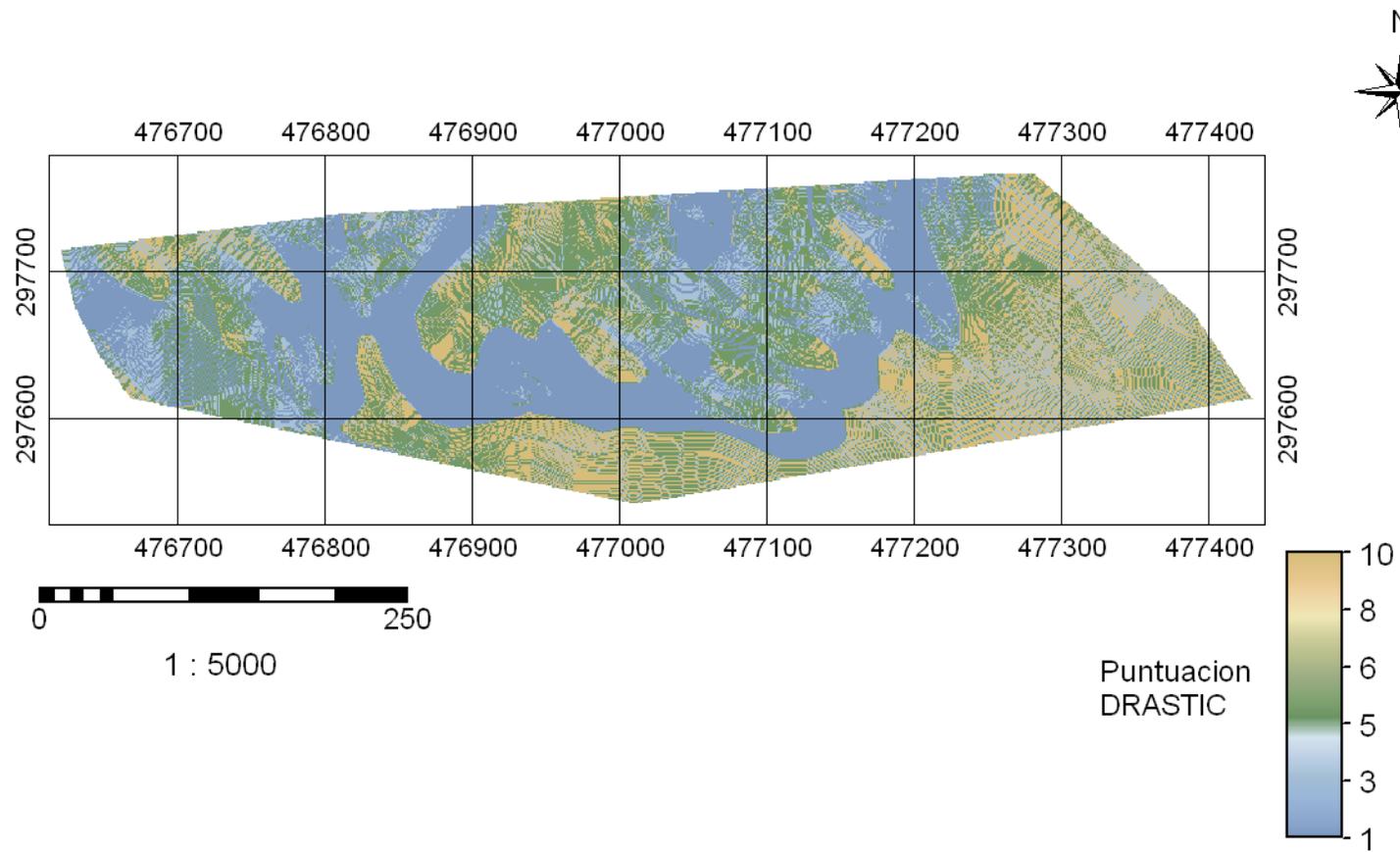


Figura 3.37 Mapa de parámetro T de DRASTIC de la zona donde se localiza el antiguo botadero de Mariona

- **Aplicación de método DRASTIC**

Obtenidos los mapas y calificaciones para cada parámetro a evaluar, procedimos a aplicar el método DRASTIC; para eso hay que recordar la Fórmula 2.17.

El resumen de los valores a sustituir o los mapas a utilizar se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Resumen de puntajes y mapas a utilizar en método DRASTIC

Parámetro	Calificación o mapa	Peso o factor de importancia
Profundidad al nivel piezométrico (D)	Mapa de parámetro D (Figura 3.30)	5
Recarga (R)	Mapa de parámetro R (Figura 3.35)	4
Material acuífero(A)	9.0	3
Tipo de suelo(S)	Mapa de parámetro S (Figura 3.36)	2
Topografía o pendiente (T)	Mapa de parámetro T (Figura 3.37)	1
Impacto de la zona no saturada según su litología (I)	9.0	5
Conductividad Hidráulica (C)	8.0	3

Por lo que la Fórmula a aplicar en ILWIS fue la 3.11.

$$DRASTIC = 5 * Dr + 4 * Rr + 3 * 9 + 2 * Sr + Tr + 5 * 9 + 3 * 8 \quad 3.11$$

Así como se realizó antes en GOD, usamos la función “slicing” para una mejor interpretación de los resultados, el domino a crear se llamó “rangos_DRASTIC” y se utilizó de base la Tabla 2.5. El resultado de esto fue el mapa final que se llamó “Vulnerabilidad_DRASTIC”.

3.3.3. Presentación de mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas

En la Figura 3.38 se presenta el mapa de vulnerabilidad de aguas subterráneas obtenido por el método DRASTIC.

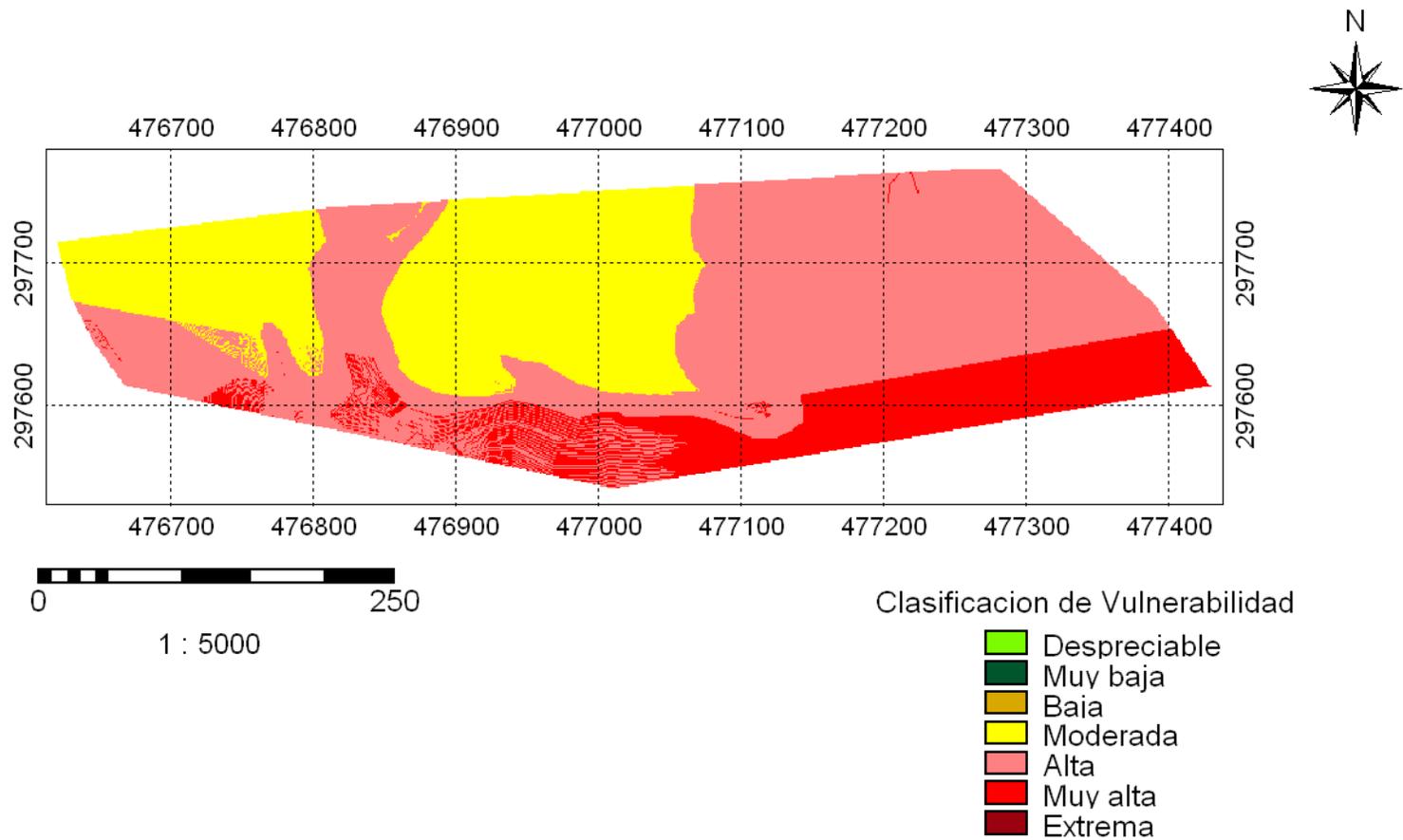


Figura 3.38 Mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Resultado de la aplicación del método DRASTIC

CAPITULO 4. Análisis de resultados y presentación de medidas de seguimiento medioambientales y técnicas de remediación de aguas subterráneas

4.1. Método GOD

En la Figura 3.28 del capítulo 3 puede observarse el resultado final de la aplicación del método GOD, el cual es un mapa donde se obtuvieron valores de vulnerabilidad que varían de 0.34 a 0.38, encontrándose dentro del rango de “0.3 – 0.5” que propone la metodología, determinándose que el área de estudio tiene vulnerabilidad “moderada”; misma que se encuentra entre la vulnerabilidad baja y alta; que indica que estas aguas subterráneas tienen una sensibilidad media ante la contaminación, por lo que los esfuerzos por remediar el daño hecho al acuífero también serían de un nivel intermedio.

En consecuencia, este grado de vulnerabilidad demuestra que se debe tener cuidado con las actividades antropogénicas que se deban de realizar en la zona, ya que la ubicación de estas podrían ser una fuente potencial de contaminación en el área. Para haber establecido este botadero se debió conocer que vulnerabilidad presentaban las aguas subterráneas del lugar; aunque para establecer un botadero ningún lugar es adecuado, mucho menos aquellos que presentan vulnerabilidades que van de moderadas a extremas. Lamentablemente en este sitio no se tomaron las medidas necesarias para evitar el flujo de contaminantes en el subsuelo, ya que ha sido comprobada previamente la existencia de una pluma de contaminación, compuesta por los lixiviados que se producen a causa de este antiguo botadero dirigida al municipio de Apopa (Rivera y Aparicio, 2009); esto tampoco quiere decir que sea el único municipio afectado.

Para analizar los resultados obtenidos, debemos comprender que el método GOD está destinado a aplicarse a grandes regiones, zonas que no poseen mucha información

relacionada a las condiciones de un acuífero, por lo que se espera definiciones menos claras en cuanto a la evaluación de la vulnerabilidad que al usar métodos como DRASTIC o SINTACS. Además, al tener condiciones tan homogéneas por la información obtenida y no ser una extensión muy grande la zona estudiada, era de esperarse que no hubiera mucha variación entre los valores de vulnerabilidad en toda el área, siendo el único parámetro que presentaba un poco de variación el de la profundidad al nivel freático (D), y al ser tan amplios los intervalos para asignar el índice de evaluación; no se esperaba también demasiada diferencia en los resultados, por lo que se obtiene un mapa con una sola clasificación de vulnerabilidad.

La Figura 4.1 muestra los diferentes rangos de los índices de evaluación correspondientes a cada tipo de vulnerabilidad, con su respectivo color que los caracteriza.

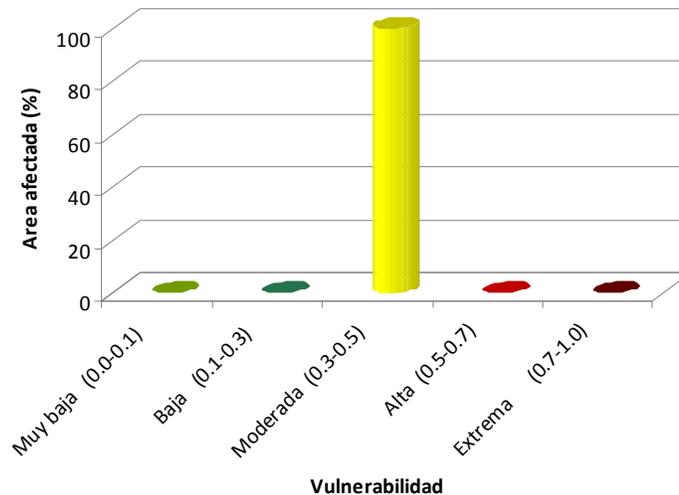


Figura 4.1 Distribución de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Método GOD.

4.2. Método DRASTIC

Con el método DRASTIC se obtuvo valores para la vulnerabilidad que varían entre 144 a 191, por lo que la zona de estudio presenta tres tipos de vulnerabilidad, tal como se muestra en la Figura 3.38, las cuales son: Moderada, alta y muy alta; en donde la primera tiene 31.9 por ciento del área total de la zona, la segunda 52.0 por ciento y la tercera 16.1 por ciento respectivamente, estas distribuciones se muestran en la Tabla 4.1 y Figura 4.2 con sus respectivos rangos de calificación correspondientes y color que los caracteriza.

Tabla 4.1 Distribución de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Método DRASTIC

Vulnerabilidad (rango)	Área afectada (%)
Despreciable (<100)	0.0
Muy baja (101-119)	0.0
Baja (120-139)	0.0
Moderada (140-159)	31.9
Alta (160-179)	52.0
Muy alta (180-199)	16.1
Extrema (>200)	0.0

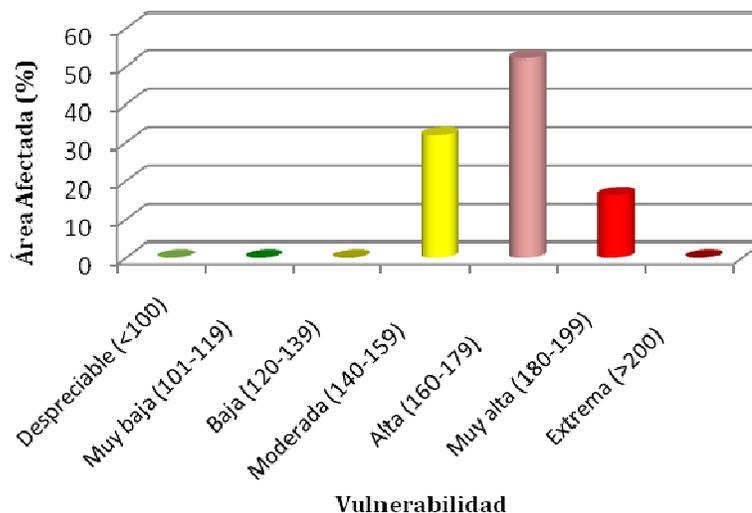


Figura 4.2 Distribución de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona. Método DRASTIC.

Para el análisis de los resultados debemos tomar en cuenta que el método posee varias limitaciones, algunas asociadas a factores externos como la calidad de la información y otras asociadas a las bases con que fue planteado el método. Entre los factores externos podemos mencionar que al preparar el mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas se tuvo que concluir que teníamos un área de estudio homogénea, esto a partir de un perfil geoelectrico, ya que no se contaba con columnas litológicas que demostraran lo contrario, se consideró que por ser una zona relativamente pequeña, no variaría mucho su litología; además se tuvo que asignar un único valor de conductividad hidráulica porque no se logró obtener un inventario de pozos con este tipo de información, ni tampoco existían estudios que relacionaran la conductividad o la transmisividad del acuífero con datos obtenidos de sondeos eléctricos, esto ya se ha hecho en estudios de algunas cuencas de Latinoamérica. También se tuvo que trabajar con curvas de nivel a cada 10 metros, ya que se quería la información topográfica de la zona antes de que se ubicara el botadero en la zona.

Entre las limitaciones que tiene el método por como fue formulado podemos mencionar el hecho de que algunos autores critican la reiteración en el alcance de algunos parámetros como “R” y “C” ya que ambos están vinculados a la renovación del agua en el acuífero y la poca incidencia que tiene el parámetro “S”.

Los resultados obtenidos indican que es necesaria una mayor protección en el lado suroeste y este del área estudiada, ya que posee vulnerabilidad de alta a muy alta, y de las visitas realizadas se verificó la presencia de basura a nivel superficial en el lado suroeste.

En el lado norte del antiguo botadero es menor la vulnerabilidad comparada con el lado sur, ya que tenemos presencia de vulnerabilidad moderada a alta. No existe presencia significativa de basura, pero se observan litoraderos superficiales en este sector.

En general más de la mitad del área de la zona de estudio se encuentra en un rango alto de vulnerabilidad, lo que es un indicativo de que en la zona no se debió ubicar un botadero a cielo abierto y que lamentablemente no se tomaron las medidas adecuadas para evitar la contaminación de las aguas subterráneas de este sector.

4.3. Análisis y comparación de resultados

Los resultados obtenidos por los métodos GOD y DRASTIC coinciden únicamente en un 31.9 por ciento, el cual es el porcentaje de vulnerabilidad “moderada” que presenta la zona aplicando el método DRASTIC, mientras que con la aplicación de GOD se obtuvo que todo la zona presenta este mismo tipo de vulnerabilidad.

La diferencia entre los métodos GOD y DRASTIC son hasta cierta manera obvias, primeramente el número de parámetros que considera cada método para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas de una determinada zona son diferentes, el método GOD considera tres tipos de parámetros; mientras el DRASTIC considera siete. Dos parámetros se utilizan en común por los métodos, que son: la profundidad al nivel freático (“D” en ambos métodos) y la cobertura del acuífero (“O” para GOD e “I” para DRASTIC), el método DRASTIC no toma en cuenta el grado de confinamiento del acuífero(G); pero sí toma en cuenta la recarga neta (R), el material que constituye el acuífero (A), tipo de suelo (S), la topografía (T) y la conductividad hidráulica (C); en donde el otro método no los considera, por lo que podemos decir que DRASTIC es más representativo y que en lo económico requiere de un presupuesto más alto que GOD, esto debido a la cantidad de información que se debe de utilizar para aplicarlo. Por lo cual su uso se ve limitado muchas veces.

En segundo lugar, debemos considerar la forma de evaluar los parámetros comunes en ambos métodos, en el parámetro “D” de GOD los rangos propuestos son mayores que los del parámetro “D” de DRASTIC, esto lo podemos evidenciar en la Figura 2.12 para

el método GOD y Tabla 2.4 para el método DRASTIC, ambas en el capítulo 2, en donde se puede observar que DRASTIC asigna una mayor calificación que GOD dependiendo del rango evaluado, y es por ello también que se tiene menos diferencia en el resultado obtenido por el método GOD. En el caso del parámetro “I” de DRASTIC, la calificación obtenida de la Tabla 2.9 del capítulo 2 es mayor a la propuesta en la Tabla 3.2 del capítulo 3. Además los parámetros “D” e “I” son los de mayor trascendencia para DRASTIC, ya que son a los que se les asigna un mayor peso o factor de importancia (ver Tabla 3.11), por lo que se puede decir; que es una de las causas por las que se tienen valores más altos de vulnerabilidad en DRASTIC que en GOD.

Cabe mencionar que para la realización de este estudio se trabajó en su mayoría con información de estudios realizados anteriormente y que no se contó con el inventario de pozos de la zona y de sus alrededores que incluyera información de la litología del lugar, por lo que se usó un perfil geoelectrico de la zona. Además se trabajó con las condiciones originales del lugar, con el objetivo de conocer el grado de sensibilidad de las aguas subterráneas de esta zona a la contaminación; tal como se muestra en los mapas de vulnerabilidad, resultados de la aplicación del método GOD y DRASTIC.

4.4. Propuestas de medidas de seguimiento medioambientales y técnicas de remediación de aguas subterráneas

Se analizarán y se plantearán dos tipos de medidas a tomar, las primeras en base a lo observado en las visitas al lugar, en donde se detectaron diversas fallas (inexistencia de muro perimetral, lloraderos superficiales, obstrucción de canaletas, etc.) en el mantenimiento de las obras que se realizaron en el cierre técnico del botadero, a las cuales se le plantea su solución y las segundas que son destinadas a la remediación del agua subterránea, presentadas de una forma teórica en vista que no se tiene la información completa para su diseño.

Dentro de las fallas que se pudo observar están las que se presentan en las siguientes Tablas, desde la 4.2 a la 4.9; en donde se detalla su ubicación en la zona, a qué afecta, la posible solución y recomendaciones de ser necesario; también se muestran fotografías que ilustran su estado, las cuales se tomaron en el primer semestre de este año 2010.

Las soluciones en relación a las fallas detectadas que se plantean son relativamente sencillas, no requieren de tecnologías caras y económicamente pudiesen ser factibles para quien debería ser el responsable de las medidas de seguimiento medioambientales en donde funcionó este botadero a cielo abierto.

Tabla 4.2 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 1

N°	1/8	Foto(s):					
Falla detectada	Inexistencia del muro perimetral.						
Ubicación	Perímetro de la zona del antiguo botadero de Mariona.						
Fecha de visita	22 de febrero de 2010						
Afecta a:							
	<table border="1"> <tr> <td>Pobladores de la zona</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> <tr> <td>Aguas Subterráneas</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> </table>		Pobladores de la zona	✓	Aguas Subterráneas	✓	Otros
Pobladores de la zona	✓						
Aguas Subterráneas	✓						
Otros	✓						
Posible solución	Reconstrucción inmediata de muro perimetral, que impida el acceso a esta zona.						
Recomendaciones	Se debe vigilar regularmente, ya que el cerco anterior fue robado por partes y tampoco se le dio el mantenimiento adecuado.						

Tabla 4.3 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 2

N°	2/8	Foto(s):						
Falla detectada	Presencia de lloraderos superficiales y cercanos a la población.							
Ubicación	Sector norte de antiguo botadero.							
Fecha de visita	22 de febrero de 2010							
Afecta a:								
<table border="1"> <tr> <td data-bbox="358 888 756 940">Pobladores de la zona</td> <td data-bbox="756 888 824 940">✓</td> </tr> <tr> <td data-bbox="358 940 756 993">Aguas Subterráneas</td> <td data-bbox="756 940 824 993">✓</td> </tr> <tr> <td data-bbox="358 993 756 1056">Otros</td> <td data-bbox="756 993 824 1056">✓</td> </tr> </table>		Pobladores de la zona	✓	Aguas Subterráneas	✓	Otros	✓	
Pobladores de la zona	✓							
Aguas Subterráneas	✓							
Otros	✓							
Posible solución	Sellar completamente con arcilla y luego compactarla.							
Recomendaciones	Se deben hacer inspecciones periódicamente, ya que sino se puede ir perdiendo el sello colocado en todo el terreno (arcilla).							

Tabla 4.4 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 3

N°	3/8	Foto(s):					
Falla detectada	Daños en el sistema de evacuación de gases (Chimeneas).						
Ubicación	Distribuidas en toda la zona						
Fecha de visita	22 de febrero de 2010						
Afecta a:							
	<table border="1"> <tr> <td>Pobladores de la zona</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> <tr> <td>Aguas Subterráneas</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> </table>	Pobladores de la zona	✓	Aguas Subterráneas	✓	Otros	✓
Pobladores de la zona	✓						
Aguas Subterráneas	✓						
Otros	✓						
Posible solución	Reconstrucción del sistema de evacuación de los gases generados por este antiguo botadero.						
Recomendaciones	Se le debería dar el mantenimiento adecuado a este sistema y realizar un estudio respecto a los gases generados, sus concentraciones y si estas cumplen con los estándares respecto a su concentración mínima en el ambiente.						

Tabla 4.5 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 4

N°	4/8	Foto(s): 						
Falla detectada	Incurción de ganado.							
Ubicación	Toda la zona de este antiguo botadero.							
Fecha de visita	22 de febrero de 2010							
Afecta a:								
	<table border="1"> <tr> <td>Pobladores de la zona</td> <td>✓</td> </tr> <tr> <td>Aguas Subterráneas</td> <td>✓</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>✓</td> </tr> </table>	Pobladores de la zona	✓	Aguas Subterráneas	✓	Otros	✓	
Pobladores de la zona	✓							
Aguas Subterráneas	✓							
Otros	✓							
Posible solución	Restringir completamente el ingreso de animales y personas al lugar; para eso ya se planteó la construcción de un muro perimetral.							
Recomendaciones	Los productos derivados de estos animales alimentados en estas condiciones son dañinos para la salud humana, por ello se debe inventariar el ganado y hacer estudios de los derivados de estos.							

Tabla 4.6 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 5

N°	5/8	Foto(s):
Falla detectada	Obstrucción de canaletas de desalojo de aguas lluvias y lixiviados.	
Ubicación	Sector sureste de botadero	
Fecha de visita	28 de Mayo de 2010	
Afecta a:		
Pobladores de la zona	✓	
Aguas Subterráneas	✓	
Otros		
Posible solución	Realizar trabajo de desalojo de material que obstruye canaletas.	
Recomendaciones	La limpieza de canaletas debe realizarse de forma periódica.	

Tabla 4.7 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 6

N°	6/8	Foto(s):					
Falla detectada	Perdida de material de cobertura por procesos de erosión.						
Ubicación	Varios sectores.						
Fecha de visita	28 de Mayo de 2010						
Afecta a:							
	<table border="1"> <tr> <td>Pobladores de la zona</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> <tr> <td>Aguas Subterráneas</td> <td style="text-align: center;">✓</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td></td> </tr> </table>	Pobladores de la zona	✓	Aguas Subterráneas	✓	Otros	
Pobladores de la zona	✓						
Aguas Subterráneas	✓						
Otros							
Posible solución	Se debe sembrar un cultivo adecuado para prevenir la erosión superficial (Zacate u otro tipo de cultivo), y en zonas donde esté muy erosionado se debe de colocar una capa de arcilla y luego sembrar un cultivo.						
Recomendaciones	Como toda medida, ésta se debe inspeccionar periódicamente y hacerle el mantenimiento adecuado.						

Tabla 4.8 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 7

N°	7/8	Foto(s):						
Falla detectada	Promontorios de basura.							
Ubicación	Principalmente en sectores de zona suroeste.							
Fecha de visita	28 de Mayo de 2010							
Afecta a:								
	<table border="1"> <tr> <td>Pobladores de la zona</td> <td>✓</td> </tr> <tr> <td>Aguas Subterráneas</td> <td>✓</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>✓</td> </tr> </table>	Pobladores de la zona	✓	Aguas Subterráneas	✓	Otros	✓	
Pobladores de la zona	✓							
Aguas Subterráneas	✓							
Otros	✓							
Posible solución	<p>Dar una opción a las personas que botan la basura en ese lugar.</p> <p>Restringir el acceso a este antiguo botadero.</p>							
Recomendaciones	<p>No se debería permitir que en este lugar se siga depositando basura, ya que en menor escala es un botadero a cielo abierto.</p> <p>Señalizar que se prohíbe botar basura en este lugar.</p>							

Tabla 4.9 Presentación de medida de seguimiento medioambiental 8

N°	8/8	Foto(s):						
Falla detectada	Pozo de visita sin reja.							
Ubicación	Sector Noroeste de botadero.							
Fecha de visita	22 de febrero de 2010							
Afecta a:								
	<table border="1"> <tr> <td>Pobladores de la zona</td> <td>✓</td> </tr> <tr> <td>Aguas Subterráneas</td> <td>✓</td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td>✓</td> </tr> </table>	Pobladores de la zona	✓	Aguas Subterráneas	✓	Otros	✓	
Pobladores de la zona	✓							
Aguas Subterráneas	✓							
Otros	✓							
Posible solución	Colocar reja a pozo de visita, para evitar que los pobladores arrojen basura en éste o sufran un accidente.							
Recomendaciones	Fijar la reja de una forma segura para que no sea quitada de este lugar.							

Respecto a las técnicas que se mencionan a continuación; éstas van enfocadas a la remediación de aguas subterráneas debido a la contaminación generada por este antiguo botadero, pero su uso depende en gran medida del factor económico y de la tecnología con que se disponga, ya que la mayoría de ellas tienen un alto costo económico y requiere de diversa información, tal como se detallará en cada una de ellas.

➤ **Técnicas de remediación de aguas subterráneas**

La limpieza del agua subterránea puede hacerse después de que el agua ha sido extraída (tratamiento ex situ) o en el acuífero (in situ). En esta sección discutiremos primero los problemas planteados al usar el método tradicional ex situ de bombeo y tratamiento. Finalmente, métodos in situ que, cuando funcionan, disminuyen enormemente los costes de recuperación de las aguas.

Sistemas convencionales de bombeo y tratamiento

La técnica de remediación de aguas subterráneas llamada de bombeo y tratamiento se basa en extraer el agua contaminada y tratarla en superficie. El efluente tratado puede ser usado para utilidades diversas o ser devuelto al acuífero. Generalmente, en esta técnica se usan uno o más pozos equipados con bombas. Cuando éstas se ponen en funcionamiento, extraen el agua contaminada de los pozos y la suben hacia la superficie. Una vez en la superficie, el agua pasa a un tanque de retención y al sistema de tratamiento donde es tratada. Se pueden utilizar diversos métodos de tratamiento, por eso se puede aplicar en una variedad de casos sin tener mayores limitantes por el tipo de contaminante a tratar; razón por la cual se propone aplicar esta técnica para remediar las aguas subterráneas del sector donde se ubica la pluma de contaminante generada por este antiguo botadero.

El coste de limpieza de un acuífero y el tiempo requerido para ello se incrementan notablemente según lo hace el nivel de limpieza requerido. En la Figura 4.3 se puede

observar una relación hipotética de estos datos para un sistema convencional. El ejemplo corresponde a una pluma de 190 millones de litros con una concentración de 1 mg/l de TCE (Tricloroetileno C_2HCl_3), usando los costes estimados por la EPA y considerando una tasa de descuento del 4%. Según N. R. Council (1994) para eliminar el 80% del contaminante se calcula que hacen falta unos 15 años y unos 2.8 millones de dólares (incluyendo capital, operación y costes de mantenimiento). Para limpiar el 99.99%, el sistema costaría 6 millones de dólares y se tardarían 84 años. Obviamente hay muchas suposiciones e incertidumbres en un cálculo de este tipo, pero las implicaciones están claras.

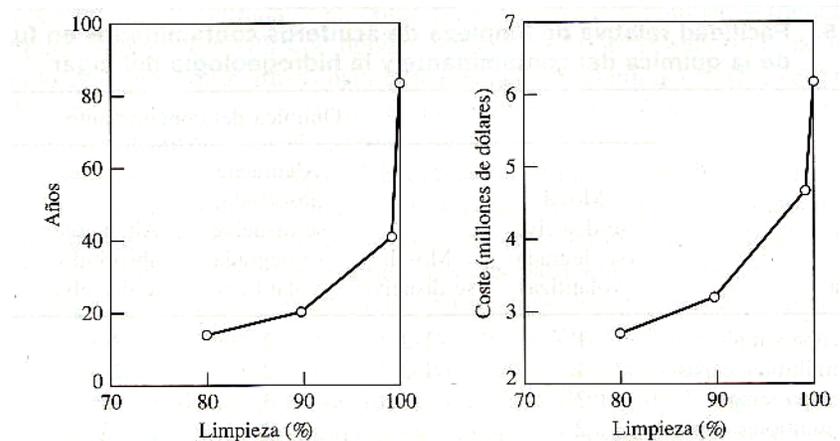


Figura 4.3 Impacto de la expectativa de limpieza en los costes y duración de un sistema convencional de bombeo y tratamiento.

Los puntos superiores corresponden a una eliminación del TCE del 99 y del 99,99%. Datos para un volumen de pluma de 190 millones de litros, una tasa de bombeo de 380 l/min, un factor de retardo de 4,8 (TCE), y una tasa de descuento del 4%.

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 271

Una hipótesis implícita en la Figura 4.3 es que la zona puede ser recuperada usando técnicas de bombeo y tratamiento. Un estudio reciente del Comité de Alternativas de Limpieza de Aguas Subterráneas (Committee on Ground Water Cleanup Alternatives) trabajando para el National Research Council, ha evaluado 77 lugares contaminados con sistemas de bombeo y tratamiento en operación (N. R. Council, 1994) y ha encontrado sólo unas pocas circunstancias en las cuales estos sistemas conseguirán probablemente

su objetivo en un lapso y a un coste razonables. Ha establecido una clasificación de lugares basada en la química del contaminante y su hidrogeología que intenta ordenarlos por su facilidad relativa de limpieza. Se han encuadrado en cuatro categorías. Los lugares de categoría 1 son los más fáciles de limpiar y los de categoría 4 los más difíciles. Los de categoría 1 se caracterizan por ser acuíferos homogéneos, de una sola capa, contaminados por sustancias que se mueven y disuelven fácilmente y que se eliminan hasta cierto punto de una forma natural por degradación o volatilización. Las técnicas de bombeo y tratamiento deberían ser capaces de restaurar la calidad de agua potable en estos pocos lugares. En el otro extremo, los puntos de categoría 4 cuentan con una compleja hidrogeología de materiales heterogéneos y múltiples capas, con intrincados recorridos de los contaminantes muy difíciles de predecir. Los contaminantes de la categoría 4 son NAPL (líquidos de fase no acuosa), con DNAPL (NAPL densos) y LNAPL que son NAPL ligeros (ver Figura 4.4 y Anexo 3).

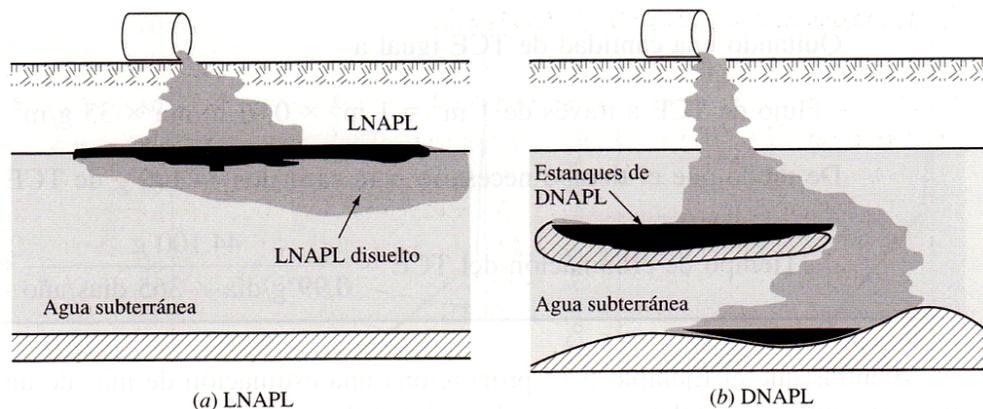


Figura 4.4 Los líquidos de fase no acuosa no se disuelven bien en el agua subterránea.
 (a) Los LNAPL flotan sobre ella; (b) Los DNAPL forman piscinas.

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 269

Master y Ela (2008) señalan que en los lugares de categoría 4 no es probable alcanzar el objetivo de calidad de agua potable. De los 77 sitios estudiados por el Comité, sólo dos fueron clasificados como categoría 1, mientras que en la categoría 4 se situaron 42. La siguiente Tabla 4.10, muestra las características de cada grupo en esas cuatro categorías.

Tabla 4.10 Facilidad relativa de limpieza de acuíferos contaminados en función de la química del contaminante y la hidrogeología del lugar

Hidrogeología	Química del contaminante					
	Móvil, se disuelve (se degrada/volatiliza)	Móvil, se disuelve	Altamente absorbido, se disuelve (se degrada volatiliza)	Altamente absorbido, se disuelve	Fase separada LNAPL	Fase separada DNAPL
Homogénea, capa simple		1-2	2	2-3	2-3	1
Homogénea, múltiples capas	1 *	1-2	2	2-3	2-3	3
Heterogénea, capa simple	2 *	2	3	3		4
Heterogénea, múltiples capas	2	2	3	3	3	4
Fracturada	3 *		3	3	4 *	4

(*) Facilidad relativa de limpieza, donde 1 es la más fácil y 4 la más difícil.

Fuente: National Research Council. 1994.

Para nuestro caso la hidrogeología que presenta la zona es homogénea, con una sola capa y según la Tabla 4.10 tendría una facilidad de limpieza que va de 1 a 3, dependiendo de la química del contaminante, de los cuales no se tiene información actualizada, por lo que no podríamos asignar un valor específico de facilidad de limpieza.

- **Curvas de zona de captura**

El modo más común de comenzar a limpiar aguas subterráneas contaminadas es instalar pozos de extracción. Cuando un pozo de extracción bombea agua, la superficie hidrostática del acuífero (la superficie piezométrica en caso de que sea cautivo) en su vecindad experimenta; una depresión, por lo que crea un gradiente hidráulico que arrastra la pluma hacia el pozo. Con pozos adecuadamente situados, las aguas subterráneas contaminadas pueden ser extraídas del acuífero, descontaminadas con un tratamiento en superficie, y utilizadas o devueltas al acuífero. Este proceso es el que se denomina técnica de bombeo y tratamiento.

La Figura 4.5 muestra el efecto de un pozo de extracción situado en una zona con un flujo estable y uniforme de agua subterránea, paralelo al eje x y en la dirección negativa de éste. Cuando se extrae el agua las líneas de corriente se curvan hacia el pozo como se observa en la Figura 4.5. La envolvente de estas líneas de corriente que convergen en el pozo se denomina curva de zona de captura. El agua comprendida dentro de esta zona será extraída; la que cae fuera, no lo será. Las líneas de flujo exteriores a la zona de captura pueden curvarse hacia el pozo pero el flujo asociado al gradiente hidráulico natural es suficientemente fuerte como para que el agua pase de largo por él.

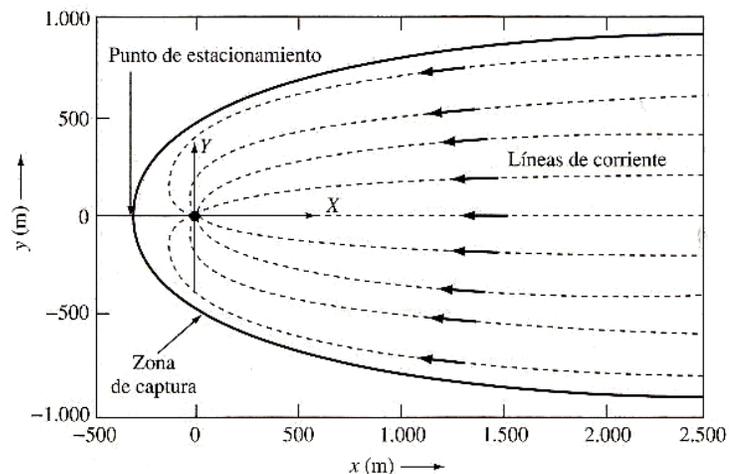


Figura 4.5 Un único pozo de extracción situado en $x=0, y=0$, en un acuífero con flujo a lo largo del eje x.

La zona de captura es la región en la cual todas las líneas de flujo convergen en el pozo de extracción.

Dibujado para Q/Bn — 2000.

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 260

Javandel y Tsang (1986) desarrollaron la técnica de las curvas de zona de captura como ayuda para diseñar campos de pozos de extracción para limpieza de acuíferos. Su análisis se basa en un acuífero ideal (es decir, homogéneo, isótropo, uniforme en sección e infinito en anchura). También, sea libre o cautivo, con unos descensos de nivel en pozos, insignificantes en comparación con el espesor total del acuífero. Suponen que los pozos de extracción se adentran en el total del acuífero y extraen uniformemente de él a cualquier nivel. Estas son hipótesis muy restrictivas que es improbable que sean

satisfechas en condiciones reales; a pesar de ello los análisis resultantes proporcionan una buena perspectiva de los factores principales que se obtienen con modelos más realistas pero más complejos.

Para un pozo único de extracción localizado en el origen de coordenadas, como muestra la Figura 4.5, Javandel y Tsang obtienen la siguiente relación entre las coordenadas x e y de la envolvente de la zona de captura:

$$y = \pm \frac{Q}{2Bv} - \frac{Q}{2\pi Bv} \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (4.1)$$

Donde:

B = Espesor del acuífero (m).

v = Velocidad de Darcy (m/día).

Q = Tasa de bombeo del pozo (m³/día).

La Ecuación (4.1) puede reescribirse en términos del ángulo (en radianes) del radio vector al punto de la zona de captura considerado, como se muestra en la Figura 4.6. Esto es:

$$\tan \phi = \frac{y}{x} \quad (4.2)$$

Por lo que, para $0 \leq \phi \leq 2\pi$

$$y = \frac{Q}{2Bv} \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \right) \quad (4.3)$$

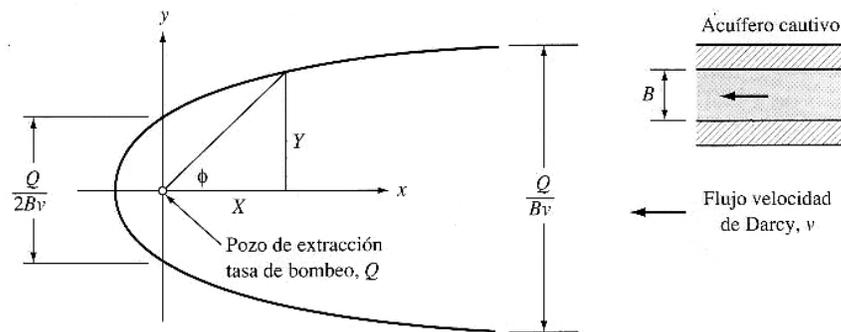


Figura 4.6 Curva de zona de captura para un pozo único de extracción situado en el origen, en un acuífero con velocidad de flujo v , espesor B y tasa de bombeo Q .

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 244

La Ecuación 4.3 facilita la predicción de algunos datos importantes de la zona de captura. Por ejemplo, cuando x tiende a infinito, $\phi = 0$, e $y = Q/2Bv$, lo que determina la anchura total de la zona de captura como $2(Q/2Bv) = Q/Bv$. Para $\phi = \pi/2$, $x = 0$, y toma el valor de $Q/4Bv$. Así la anchura de la zona de captura medida sobre el eje y es $Q/2Bv$, que es sólo la mitad del valor que adquiere lejos del pozo. Estas relaciones están ilustradas en la Figura 4.6.

La anchura de la zona de captura es directamente proporcional a la tasa de bombeo Q , e inversamente proporcional al producto de la velocidad de Darcy v (sin el efecto del pozo) y la anchura del acuífero B . Velocidades de flujo mayores requieren entonces tasas más altas de bombeo para capturar la misma área de pluma. Normalmente habrá una tasa máxima de bombeo determinada por el descenso máximo aceptable del nivel del pozo que restringe el tamaño de la zona de captura. Suponiendo que se hayan determinado las características del acuífero y definido los límites de la pluma, un método de usar curvas de zona de captura es dibujar primero la curva correspondiente a la tasa máxima aceptable de bombeo. Entonces superponiendo la pluma sobre la curva de zona de captura (dibujada a la misma escala), se puede determinar si un único pozo será suficiente para extraerla y, si es el caso, dónde perforar éste. La Figura 4.7 sugiere el método y el siguiente ejemplo ilustra su uso para una pluma ideal.

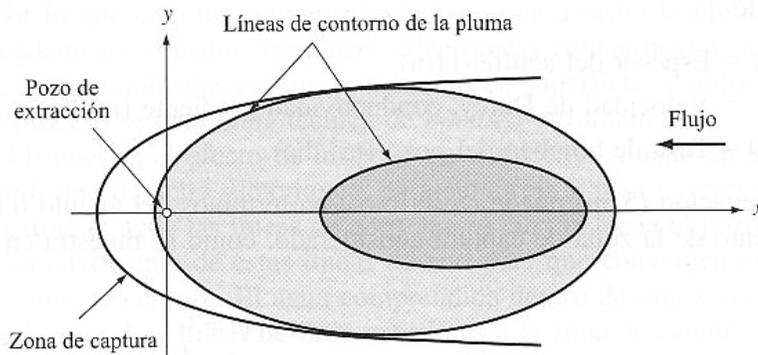


Figura 4.7 Superposición de la pluma en una curva de zona de captura para un solo pozo de extracción

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 262

EJEMPLO 4.1 Un solo pozo de extracción

Consideremos un acuífero cautivo con un espesor de 20 m, una conductividad hidráulica de 1×10^{-3} m/s, y un gradiente hidráulico de 0.002. La tasa máxima de bombeo ha sido calculada en $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$. El acuífero se ha contaminado y, por simplicidad, consideraremos que la pluma tiene forma rectangular, con una anchura de 80 m. Situar un pozo de modo que pueda extraer totalmente la pluma.

Solución. Determinemos primero la velocidad de Darcy:

$$v = K \frac{dh}{dx} = 1 \times 10^{-3} \text{ m/s} \times 0.002 = 2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

Ahora hallaremos las dimensiones críticas de la zona de captura. Medida sobre el eje y su anchura es de:

$$\frac{Q}{2Bv} = \frac{0.004 \text{ m}^3/\text{s}}{2 \times 20 \times 2 \times 10^{-6} \text{ m/s}} = 50 \text{ m}$$

Y a una distancia infinita gradiente arriba, la anchura de la zona de captura es

$$\frac{Q}{Bv} = 100 \text{ m}$$

Así la pluma de 80 m de anchura cabrá perfectamente en la zona de captura si el pozo está situado a cierta distancia gradiente abajo respecto del borde frontal. Usando la Figura 4.8 como guía, podemos determinar la distancia x que debe separar la pluma del pozo. De (4.3) con $y = 40$ m:

$$y = \frac{Q}{2Bv} \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \right) = 40 = 50 \left(1 - \frac{\phi}{\pi} \right)$$

Así, el ángulo en radianes en el punto donde la pluma toca la zona de captura es:

$$\phi = 0.2\pi \text{ rad}$$

Y, de la Figura 4.8:

$$x = \frac{y}{\tan \phi} = \frac{40}{\tan(0.2\pi)} = 55 \text{ m}$$

El pozo de extracción debería perforarse 55 m por delante de la pluma y directamente en línea con ella.

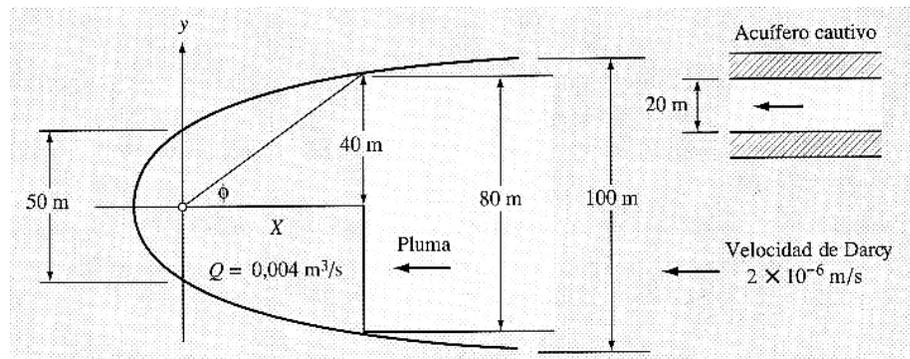


Figura 4.8 Ubicación de un único pozo de extracción por delante de una pluma de contaminante
Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 263

La solución para un pozo único encontrada en el Ejemplo 4.1 no es necesariamente buena. El pozo está lejos de la pluma, gradiente abajo, lo que significa que debe bombearse un gran volumen de agua limpia antes de que la pluma de contaminante llegue hasta él. Esto puede suponer años de bombeo e incrementar considerablemente el coste total de rehabilitación del acuífero.

Una mejor solución implica más pozos de extracción colocados próximos a la cabeza de la pluma. Javandel y Tsang han deducido curvas de zona de captura para un conjunto de n pozos óptimamente emplazados bombeando al mismo ritmo Q , y alineados a lo largo del eje y . Se define optimización como el máximo espaciado entre pozos que no permiten el paso de flujo a través de la línea que los une. La distancia de separación entre dos pozos se ha calculado en $Q/\pi Bv$. Si los pozos están más separados que esto, algo de flujo puede pasar entre ellos y no ser capturado. Con este espaciado óptimo, los dos pozos capturarán una pluma de anchura Q/Bv medida sobre el eje y , y de anchura $2Q/Bv$ suficientemente lejos de los pozos, como se muestra en la Figura 4.9(a). Parámetros análogos para el caso de tres pozos óptimamente espaciados se dan en la Figura 4.9 (b).

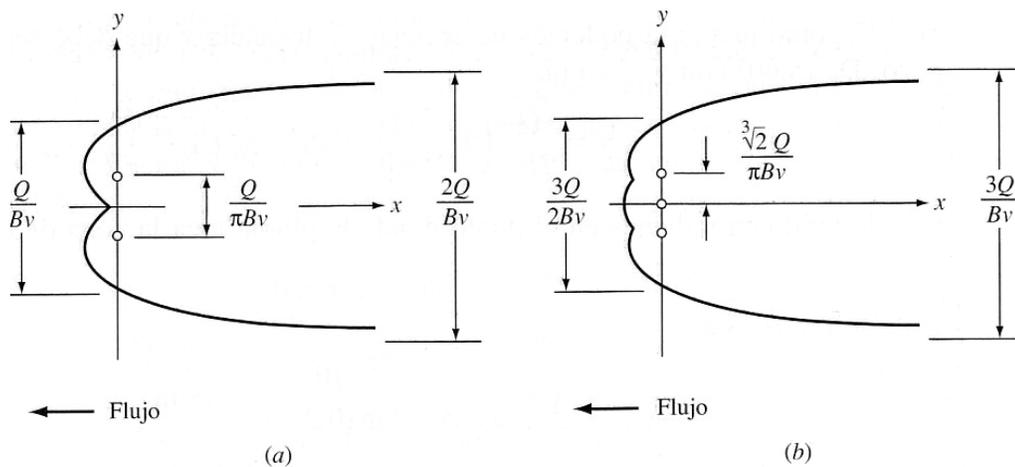


Figura 4.9 Curvas de captura para pozos óptimamente espaciados a lo largo del eje y , bombeando a una tasa Q : (a) dos pozos; (b) tres pozos.

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 264

Una ecuación general para la mitad positiva de la curva de captura para n pozos óptimamente espaciados, situados regularmente a lo largo del eje y , es:

$$y = \frac{Q}{2Bv} \left(n - \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n \phi_i \right) \quad (4.4)$$

Donde ϕ_i es el ángulo que forma la recta que une el pozo i -ésimo con un punto de la curva de captura, con la horizontal.

Para demostrar el uso de estas curvas, repetiremos el Ejemplo 4.2, pero esta vez con dos pozos.

EJEMPLO 4.2 Zona de captura con dos pozos

Consideremos la misma pluma descrita en el Ejemplo 4.1, es decir, un rectángulo de 80 m, en un acuífero cautivo de espesor $B = 20$ m y velocidad de Darcy $v = 2 \times 10^{-6}$ m/s.

- a) Si dos pozos óptimamente emplazados se alinean a lo largo del borde de ataque de la pluma, ¿qué tasa de bombeo mínima aseguraría la captura completa de la pluma? ¿Qué distancia separaría los pozos?.
- b) Si la pluma mide 1.000 m de largo, y la porosidad del acuífero es de 0,30. ¿Cuánto tiempo se tardará en bombear una cantidad de agua igual al volumen contenido en la pluma? Advertir que llevará muchísimo más tiempo bombear la pluma entera de lo que sugiere esta estimación puesto que habrá agua no contaminada extraída junto con la pluma, y estamos ignorando el retardo.

Solución.

- a) La anchura de la pluma sobre el eje y (y el borde de ataque de ésta) es de 80 m, así a la vista de la Figura 4.9.

$$\frac{Q}{Bv} = \frac{Q}{20m \times 2 \times 10^{-6} \text{ m/s}} = 80m$$

$$Q = 0.0032 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (cada uno)}$$

De la Figura 4.9, el espaciado óptimo entre dos pozos viene dado por

$$\text{Espaciado optimo} = \frac{Q}{\pi Bv} = \frac{0.0032 \frac{m^3}{s}}{\pi \times 20m \times 2 \times 10^{-6} \frac{m}{s}} = 25.5m$$

Estas medidas se muestran en la Figura 4.10

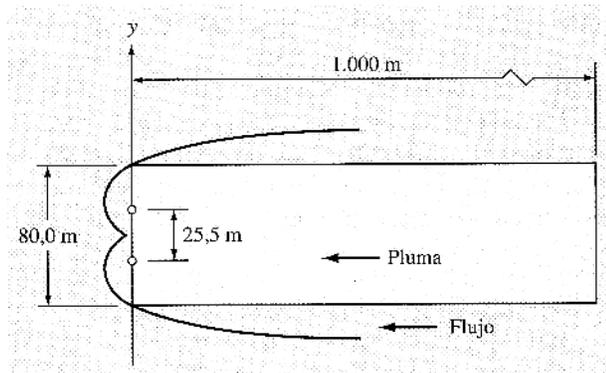


Figura 4.10 Ubicación de dos pozos de extracción en el frente de una pluma de contaminante

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 265

- b) El volumen de agua contaminada en la pluma es la porosidad multiplicada por el volumen de la pluma:

$$V = 0,30 \times 80 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 1.000 \text{ m} = 480.000 \text{ m}^3$$

A una tasa total de bombeo de $2 \times 0,0032 \text{ m}^3/\text{s} = 0,0064 \text{ m}^3/\text{s}$, llevaría:

$$t = \frac{480.000 \text{ m}^3}{0.0064 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \times 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \times 365 \frac{\text{días}}{\text{año}}} = 2.4 \text{ años}$$

Bompear un volumen de agua igual al contenido en la pluma. De nuevo observemos, sin embargo, que el tiempo requerido para bombear la pluma real sería mucho mayor que 2.4 años dependiendo del retardo y de la fracción de agua que pertenece realmente a la pluma.

Las plumas de contaminación reales y los acuíferos son mucho más complejos y diseñar un campo de pozos es una tarea mucho más difícil que la que se ha presentado aquí, por lo que se requiere de una amplia información para su aplicación.

- **Control de plumas de aguas subterráneas**

Los pozos de alrededor del antiguo botadero están siendo contaminados por los lixiviados que éste genera, pero existe un modo de proteger a estos y es combinando pozos de extracción con pozos de inyección. Los pozos de extracción se usan para rebajar el nivel freático (o superficie piezométrica), creando un gradiente hidráulico que arrastra la pluma a los pozos. Los pozos de inyección elevan el nivel freático y empujan la pluma. Por medio de un cuidadoso diseño del emplazamiento y ritmo de bombeo de estos pozos, podemos manipular el gradiente hidráulico de tal modo que las plumas puedan mantenerse apartadas de los pozos de agua potable y dirigirlas hacia los de extracción. Una vez extraída, el agua contaminada puede ser tratada y reinyectada de nuevo al acuífero, utilizada o liberada en el sistema hídrico superficial.

La Figura 4.11 muestra dos estrategias para controlar una pluma contaminante que amenaza un pozo cercano, aquí llamado pozo de producción. En la Figura 4.11 (a) un pozo de inyección empuja la pluma lejos del de producción. Pozos adicionales serían perforados sobre la pluma misma para extraerla. En la Figura 4.11 (b), se usa diferente método. El pozo de inyección se usa para empujar la pluma hacia el de extracción y así ésta puede ser evacuada más rápidamente del acuífero.

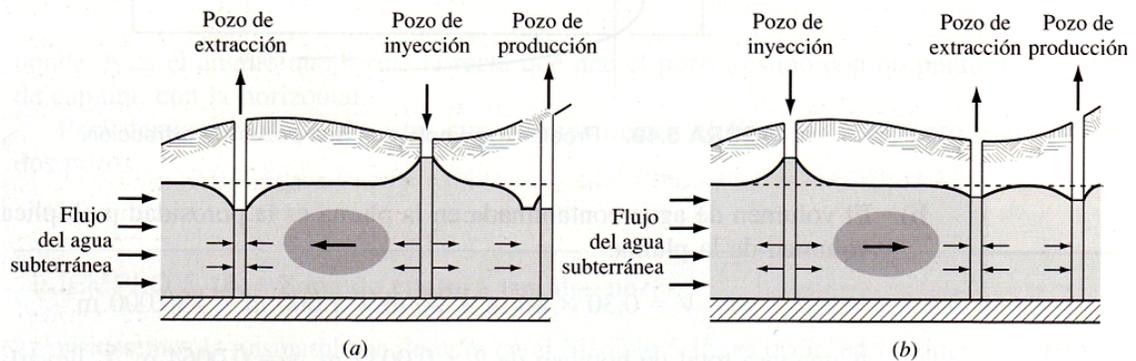


Figura 4.11 Manipulación del gradiente hidráulico con múltiples pozos.

(a) Los pozos de inyección y extracción empujan y arrastran la pluma lejos del pozo de producción; (b) El pozo de inyección empuja la pluma hacia el de extracción.

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 266

A la manipulación del gradiente hidráulico para controlar y suprimir una pluma de contaminante en aguas subterráneas se le llama control hidrodinámico. El campo a diseñar para crear el control hidrodinámico puede consistir en un único pozo, convenientemente emplazado y bombeando a la tasa correcta, o una compleja red de pozos de inyección y extracción.

El control hidrodinámico de plumas es una forma efectiva de proteger los pozos de producción. Los costes de construcción son relativamente bajos y si el campo original no es suficiente para controlar la pluma adecuadamente, siempre es posible perforar pozos adicionales. Además, la repercusión ambiental en la superficie es mínima. En el lado negativo hay que constatar que los costes de operación y mantenimiento pueden ser altos ya que los pozos deben bombear durante muchos años.

Un método alternativo de proteger los pozos de producción es rodear la pluma literalmente con una envoltura de material impermeable que se extienda desde la superficie hasta el acuífero. Son posibles varios métodos de contención física utilizando diferentes materiales y técnicas de construcción. Tal vez el más común sea el de la barrera de lodo en el que se excava una zanja estrecha, de 1 o 2 m de ancho, alrededor de la pluma, hasta el lecho rocoso, y luego se rellena con una mezcla relativamente

impermeable de tierra y bentonita. La barrera de lodo mantiene la pluma confinada mientras se aplican otras medidas de recuperación para limpiar el acuífero.

Intentar conseguir la limpieza del agua subterránea hasta el estándar de agua potable parece un objetivo vano para los acuíferos más contaminados. Esta eficacia limitada ha motivado el desarrollo de técnicas alternativas para potenciar o sustituir los sistemas convencionales. Siguen ahora unas descripciones generales de las técnicas más ampliamente usadas.

- **Biorrecuperación in situ**

Las técnicas de biorrecuperación de acuíferos pueden ser una alternativa viable a aplicar en un sitio que este generando lixiviados, porque existen numerosos microorganismos que biotransforman sustancias inorgánicas, como los metales pesados; es por ello que se presenta esta técnica como una opción para remediar las aguas subterráneas contaminadas de este sector del antiguo botadero y de sus alrededores. Estos sistemas in situ se han diseñado para degradar la polución del subsuelo sin necesidad de extraer los contaminantes y someterlos a un sistema de tratamiento en superficie. Tratando los contaminantes in situ se elimina la necesidad de excavación, tratamiento en superficie y transporte a un vertedero, y el riesgo de exposición de los operarios a los productos químicos peligrosos se reduce en gran medida. Hay otras ventajas también, entre ellas el potencial para degradar compuestos que son sorbidos por los materiales del subsuelo.

La biorrecuperación se basa en la estimulación del crecimiento de microorganismos, fundamentalmente bacterias, autóctonos del subsuelo, que pueden biodegradar contaminantes. Si se les administra oxígeno (u otro aceptador de electrones) y nutrientes, los microorganismos pueden degradar un buen número de contaminantes del suelo y de las aguas subterráneas, especialmente hidrocarburos del petróleo, dióxido de carbono y agua. Si la contaminación está próxima a la superficie, el sistema de tratamiento puede

ser tan simple como un túnel de infiltración que permita percolar agua rica en oxígeno y nutrientes hasta la zona de contaminación. Cuando se encuentra más profunda, es necesario un sistema de inyección como el que se muestra en la Figura 4.12 que haga llegar la preparación acuosa a la zona deseada. Se puede suministrar el oxígeno necesario para la descomposición aerobia haciendo burbujear aire u oxígeno en el agua inyectada, o añadiendo peróxido de hidrógeno a ésta. Los nutrientes añadidos suelen ser nitrógeno y fósforo cuando los contaminantes son hidrocarburos. Se pueden añadir pozos de extracción para controlar el flujo del agua inyectada.

La biorrecuperación in situ puede aplicarse también a contaminantes más problemáticos que los hidrocarburos, como los disolventes clorados y los metales. La biodescomposición de los compuestos clorados puede realizarse de forma aerobia o anaerobia. La primera es realizada por bacterias metanotrofas, que extraen su energía del metano. Para fomentar su crecimiento, el metano se inyecta en el acuífero contaminado. En el proceso de consumir el metano, las bacterias metanotrofas producen una enzima que tiene la capacidad de transformar contaminantes peligrosos que son ordinariamente resistentes a la biodegradación. Estudios de campo han demostrado que se alcanzan altas tasas de transformación de compuestos clorados, como por ejemplo en algunos casos en cuestión de días: tricloroetileno, 20 a 30%; cis-1,2-dicloroetileno, 45 a 55%; trans-1,2-dicloroetileno, 80 a 90%; y cloruro de vinilo, 90 a 95%.

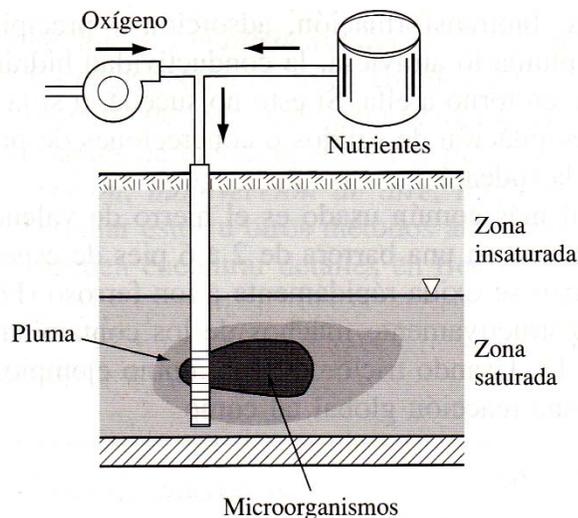


Figura 4.12 Técnica de remediación de aguas subterráneas por Biorrecuperación in situ.
 Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 275

Los disolventes clorados pueden también degradarse de forma anaerobia. En este caso las bacterias biodegradantes son otras y entre los nutrientes requeridos se cuentan donadores de electrones, como el metanol, la glucosa o el acetato. Algunos productos intermedios de esta biodegradación, como el cloruro de vinilo, son peligrosos en sí mismos, por lo que hay que actuar con precaución. Es posible llegar con esta degradación a etano y eteno simples, pero los procesos anaerobios transcurren mucho más lentamente que los correspondientes aerobios, por lo que esta degradación puede llevar años.

- **Barreras reactivas permeables**

Las barreras reactivas permeables (PRB), son estructuras subterráneas que sirven para tratar aguas subterráneas contaminadas en situ, producidas por el avance de la pluma de contaminación generada por los lixiviados de los desechos peligrosos enterrados en zonas como en nuestro caso, tratándose de un antiguo botadero y conociendo que esta técnica es aplicada en sitios contaminados con diversas sustancias, entre las que se cuentan: metales pesados (cromo, níquel, plomo, cobre, manganeso, uranio, arsénico,

selenio, vanadio, etc), Compuestos Orgánicos Volátiles (que incluyen solventes clorados como el Tetracloroetano (PCE), Tricloroetano (TCE) y Cloruro de vinilo) e hidrocarburos (BTEX); se propone evaluar y aplicar esta técnica de ser factible para remediar las aguas subterráneas de este sector del antiguo botadero y de sus alrededores.

Desde mediados de los 90's, las barreras reactivas permeables han suscitado más atención y han recabado más estudio que ninguna otra técnica para descontaminar el subsuelo (L.J.S. EPA, 1998). Como se muestra en la Figura 4.13, la PRB es una barrera permeable de material especialmente escogido para que pasen las aguas contaminadas.

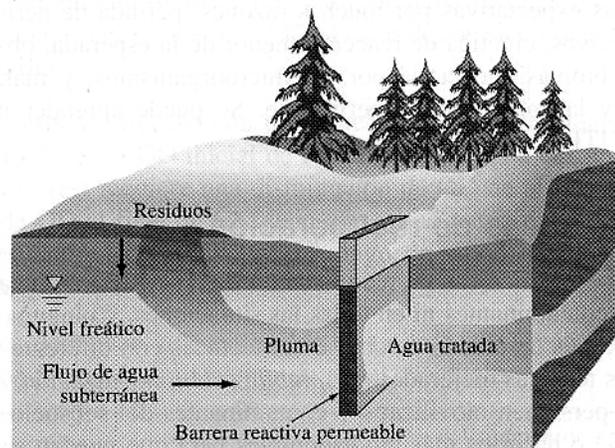
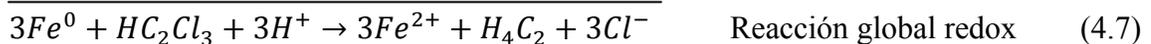


Figura 4.13 Barrera reactiva permeable para el tratamiento de una pluma contaminante en aguas subterráneas

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 275

En el tránsito a su través, los contaminantes son eliminados por uno o más procesos, como la degradación abiótica redox, biotransformación, adsorción y precipitación. Puesto que la PRB es sólo efectiva si la pluma lo atraviesa, la conductividad hidráulica de la PRB debe ser mayor que la del acuífero en torno a ella. Si esto no sucede, o si la PRB se obstruye por la filtración de partículas, precipitación de sólidos o concreciones de productos de reacción sólidos, el agua se desviará y la rodeará.

El material más común usado es el hierro de valencia cero en limaduras (ZVI), que se coloca típicamente en una barrera de 2 a 6 pies de espesor. El hierro en el estado de oxidación cero (Fe(0)) se oxida rápidamente a ion ferroso (Fe(II)), y los electrones perdidos pueden reducir destructivamente muchos de los contaminantes orgánicos halogenados (ver Anexo 3). Usando tricloroetileno, como ejemplo, la descloración reductiva completa puede seguir una reacción global tal como:



De forma similar a la Ecuación 4.7, el puede ser usado para tratar ciertos iones inorgánicos sensibles-redox como el cromo desde el estado Cr(VI) al menos móvil Cr(III).

Para eliminar otros contaminantes se pueden emplear otros materiales solos o junto con él. Del mismo modo se pueden incorporar a las barreras reactivas nutrientes destinados al crecimiento microbiano y con ello conseguir a la vez una biorrecuperación y la eliminación de algunos contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. Los microbios estimulados por las PRB no solamente se han usado para degradar directamente un contaminante sino también para producir reactivos, como el sulfuro, que, o bien reacciona con él o lo hace precipitar. Si se usa cal en la barrera el pH puede subir suficientemente cómo para que ciertos metales precipiten. En otras aplicaciones se ha utilizado un sorbente, el hidróxido férrico, para adsorber contaminantes como el arsénico o el plomo (U.S. EPA, 1998).

Las barreras reactivas son atractivas porque suelen tener unos costes relativamente bajos, permiten limpiar ciertos contaminantes difíciles de tratar por otros medios y no necesitan mantenimiento una vez instaladas. Sin embargo sus prestaciones a largo plazo

no siempre han sido completamente satisfactorias. Las PRB no han funcionado o lo han hecho por debajo de las expectativas por muchas razones: Pérdida de permeabilidad, pérdida de hierro u otros reactivos, cinética de reacción menor de la esperada, obstrucción del medio o inactivación por biomasa generada por los microorganismos, y mala conexión hidráulica entre el acuífero y la zona reactiva permeable.

CAPITULO 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Respecto al mapa de vulnerabilidad obtenido con el método GOD, se puede observar un solo resultado, como es la vulnerabilidad moderada en toda la zona donde se ubica este antiguo botadero; la cual se obtuvo mediante la evaluación de tres parámetros, como su método lo indica; en donde dos de ellos eran constantes en toda la zona, variando únicamente la profundidad al nivel freático y que la mayoría de estos valores pertenecían a un solo rango de evaluación; razón por la cual hubo poca variación en el resultado.
- Sobre el mapa de vulnerabilidad obtenido por el método DRASTIC se pueden observar tres resultados: Vulnerabilidad moderada, alta y muy alta, predominando la vulnerabilidad alta en esta zona; la cual se obtuvo mediante la evaluación de siete parámetros, de los que 4 de ellos son variables en toda la zona; mientras los otros tres son constantes.
- La diferencia en los resultados obtenidos por el método GOD y DRASTIC, se debe al número y tipos de parámetros considerados en cada método; así como a la forma diferente de evaluación de cada uno de ellos, ya que DRASTIC asigna un peso (factor que va de 1 a 5), según sea la importancia de cada parámetro; mientras GOD les da la misma importancia a los tres parámetros, ya que no considera un factor extra para cada uno.
- Los mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación son instrumentos de apoyo para la planificación y ordenamiento del territorio y dan la pauta para una mayor intervención y/o investigación acerca de la contaminación en sitios específicos.

- Según los resultados de vulnerabilidad obtenidos se puede determinar que este lugar no era el adecuado para establecer un botadero a cielo abierto, ya que la zona presenta vulnerabilidades altas.
- La condición actual de este antiguo botadero no es la adecuada, ya que las medidas que se hicieron en el cierre técnico están dañadas y algunas han desaparecidos totalmente.
- El uso de un programa de Sistemas de Información Geográfica, como el utilizado (ILWIS 3.7) permitirá la renovación y actualización de la información, logrando así obtener nuevas evaluaciones si algunos de los parámetros cambian con el tiempo o si existen cambios en la información.
- La utilización de los métodos GOD y DRASTIC estará sujeta al conocimiento que se tenga de dichos métodos y a los recursos económicos con los que se cuenta, ya que la cantidad de parámetros considerados es diferente en ambos métodos y la obtención de todos ellos requieren de equipo e información a veces inexistente, lo cual dependerá de la zona donde se realice el estudio y/o que las instituciones que tengan dicha información la proporcionen.
- Dadas las características de cada método, para nuestro país el más factible es el método GOD, ya que su aplicación requiere de menor cantidad de información y sus resultados son confiables.
- El mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de la zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona es una herramienta importante, que permitirá al complementarse con un estudio de la contaminación actual, determinar el riesgo que se tiene por la presencia de este antiguo botadero en el lugar.

5.2. Recomendaciones

- Se debería crear un mapa que muestre la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en zonas de recarga de todo el país y que sirva para tomarlo en cuenta en un plan de ordenamiento territorial.
- Dar a conocer el manejo de por lo menos un Sistema de Información Geográfica en cátedras como Hidrología y Manejo de Recursos Hídricos, ya sea ILWIS, Surfer o ArcGis, en donde el estudiante pueda conocer lo básico de un programa y los diversos usos que tiene.
- Se deberían implementar las medidas de seguimiento medioambientales propuestas, tales como: La construcción del muro perimetral, sellado de lloraderos, detener procesos de erosión, entre otras; ya que estas vendrían a ayudar a prevenir a que se vean afectados los pobladores del lugar, así como las aguas subterráneas.
- Debe obtenerse la mayor cantidad de información posible de campo e información de pozos, en cuanto a la litología y otros datos hidrogeológicos necesarios para evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la contaminación de esta zona donde se ubica el antiguo botadero de Mariona y afinar los resultados encontrados.
- Para ubicar cualquier tipo de proyecto, se debe realizar un estudio que determine las áreas de protección de pozos existentes en la zona, con el fin de proteger el recurso hídrico subterráneo.
- Se deberían establecer convenios o proyectos con instituciones públicas, para facilitar el intercambio de información para realizar estudios de este tipo.

- Dado que con el presente estudio se ha logrado conocer la sensibilidad que muestra la zona a la contaminación de las aguas subterráneas, se recomienda realizar un estudio que determine el riesgo generado por los contaminantes generados por la presencia de este antiguo botadero en este lugar.
- Evaluar las técnicas de remediación de aguas subterráneas presentadas en este trabajo e implementar la que se considere factible, lo cual dependerá de la información y recursos económicos con los que se cuente.
- Monitorear regularmente las condiciones químicas y bacteriológicas de las aguas subterráneas de esta zona y de sus alrededores, para conocer el estado de este recurso.
- Determinar el área de afectación producida por el avance de la pluma de contaminantes que genera este antiguo botadero a medida que transcurre el tiempo y así establecer algunas medidas que vayan enfocadas a preservar este recurso y prevenir enfermedades en la población.
- Evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas de este sector donde se ubica este antiguo botadero por otros métodos y comparar los resultados obtenidos con los de este estudio.

BIBLIOGRAFIA

Acurio, G. (2007). *Diagnostico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en America Latina y el Caribe. Publicación BID y OPS.* Washington, Estados Unidos.

Alvarado, C. (2007). *Modelo Conceptual y Vulnerabilidad Intrínseca del Acuífero Quezaltepeque-Nejapa.* San Salvador, San Salvador, El Salvador.

Auge, M. P. (2004). *Vulnerabilidad de acuíferos Conceptos y Metodos.* Buenos Aires, Argentina.

Auge, M. P. (2006). *Agua subterránea deterioro de calidad y reserva.* Buenos Aires, Argentina.

Beatriz Gil. (2007) *Mapa y estudio de Recarga Acuífera del Área Metropolitana de San Salvador, zona prioritaria No 1: Faldas del Volcán de San Salvador-Cuenca del Río Acelhuate.* El Salvador.

Carmen Solano, Fredy Benavides. *Simulación de la calidad de recursos hídricos en el Río Sucio y Río Acelhuate y mapeo de vulnerabilidad a la contaminación en las subcuencas Sucio, Acelhuate y Cuaya.* Trabajo de Graduación Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA). El Salvador. 1997

Cerros, G. (Octubre de 2007). *Un enfoque de gestión ambiental del recurso hídrico desde la perspectiva de la vulnerabilidad de acuíferos.* Antiguo Cuscatlan, El Salvador.

CONAM, CEPIS/OPS. (2004). *Guía técnica para la clausura y conversión de botaderos de residuos sólidos*. Documento del Consejo Nacional del Ambiente y el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Peru.

Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.

Escobar, M., Garcia, J., & Guerrero, T. (2002). *Metodología para la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas aplicada en el Valle de Zapotitán*. Antiguo Cuscatlan, El Salvador.

Francisco Rivera, Osmany Aparicio. (2009). *Evaluación geoelectrica del antiguo botadero de residuos sólidos urbanos de Mariona*. Trabajo de Graduación UES. El Salvador.

Gilbert M. Masters, Wendell P. Ela. (2008) *Introducción a la ingeniería medioambiental*. 3ª edición. Pearson Madrid. España.

Gregory Philip Nottingham, Yaneth Maribel Márquez Mejía. *Condiciones ambientales del basurero de Nejapa: Resultados de la investigación de agua, aire y suelo de la zona del Botadero*. Investigación realizada por la Universidad Luterana Salvadoreña. El Salvador 1998.

Hirata, R., & Rebouças, A. (2001). *La protección de los recursos hídricos subterráneos: Una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos*. Recuperado el 22 de Abril de 2010, de <http://www.medioambienteonline.com>

ITC. (2007). *proyecto UNESCO-RAPCA*. Recuperado 22 de Junio 2010, de <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/Pagina%20Casos%20de%20estudio.html>

Johnson División OUP Inc. (1975). *El agua subterránea y los pozos*. Minnesota.

Jorge Fallas (2002). *Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en Costa Rica: Una aproximación utilizando el modelo DRASTIC y Sistemas de Información Geográfica*. Costa Rica

Ministerio de Cultura y Comunicaciones, Ministerio de Educación. Ministerio de Obras Públicas. (1986) *Geografía de El Salvador*. Primer tomo. San Salvador. El Salvador.

Rios, L., & Velez, M. (2008). *Vulnerabilidad a la Contaminacion, Zona Sur Acuífero del Valle del Cauca, Colombia*. Medellin, Colombia.

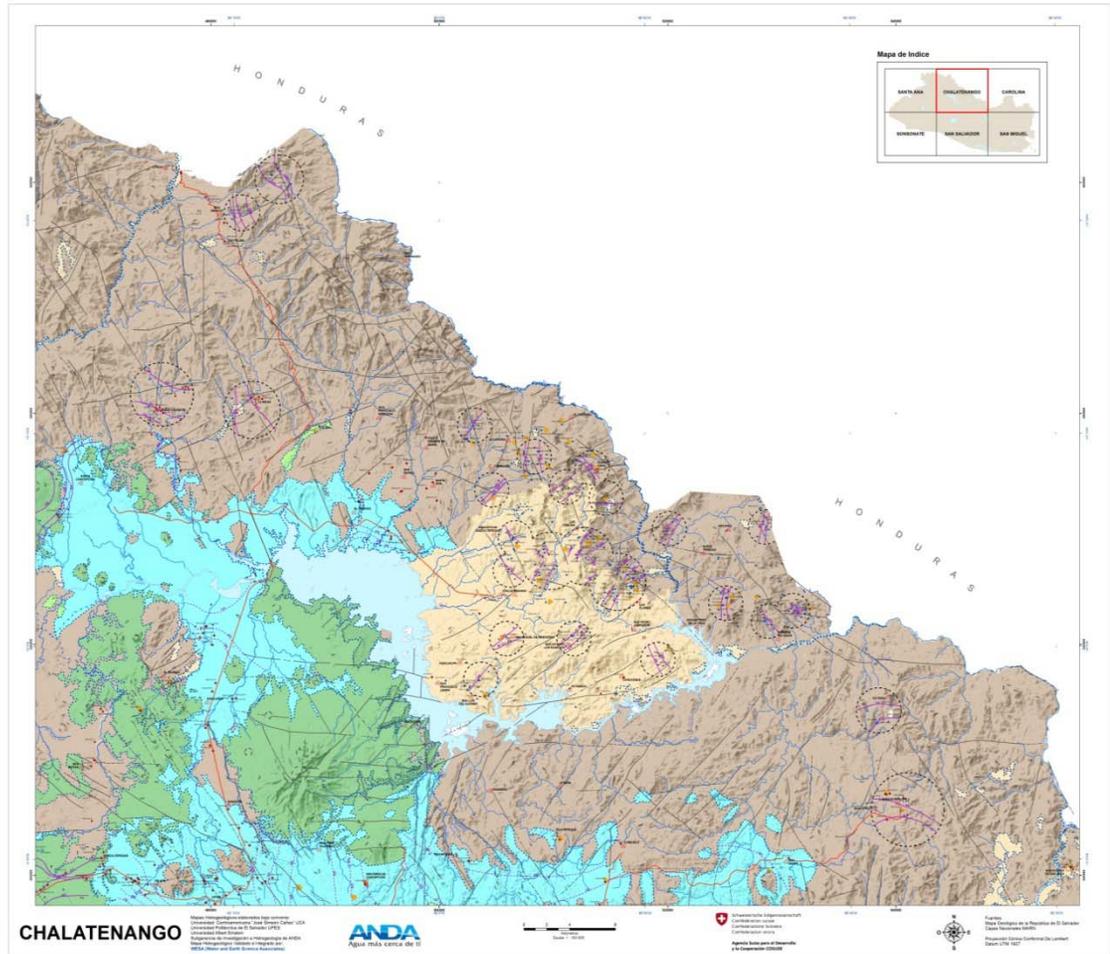
Valverde, J., & Mesalles, R. (2009). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica*. Recuperado el 22 Abril de 2010, de <http://proceedings.esri.com>

wikipedia. (s.f.). *Sistema de Información Geográfica*. Recuperado el 22 de Abril de 2010, de <http://es.wikipedia.or>

ANEXOS

ANEXO 1

Mapa Hidrogeológico. Cuadrante Chalatenango



ANEXO 2

Ubicación de pozos y manantiales cercanos a la zona donde se ubica el antiguo botadero Mariona

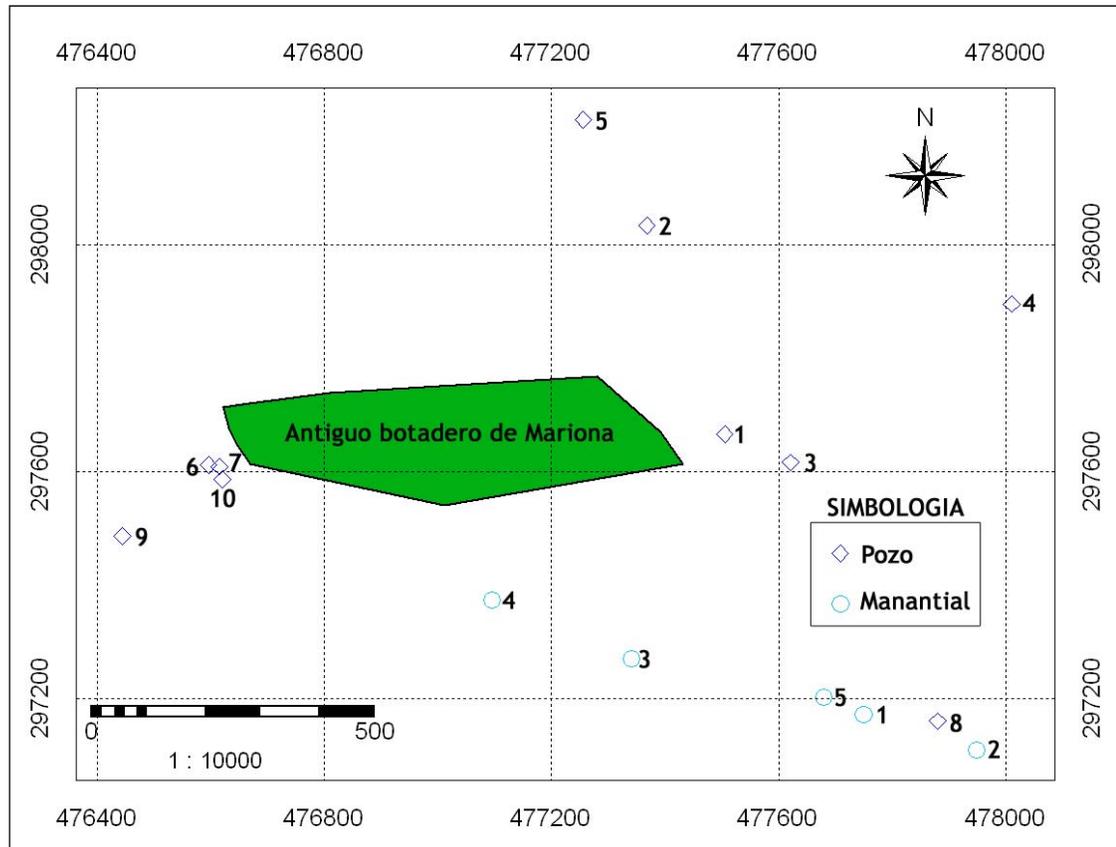


Figura A2. Ubicación de pozos y manantiales cercanos al antiguo botadero de Mariona

ANEXO 3

Contaminantes frecuentes en aguas subterráneas

Los 25 contaminantes más frecuentemente detectados en el agua subterránea de lugares con residuos peligrosos aparecen en la lista de la Tabla A3. Nueve de ellos son inorgánicos: Plomo (Pb), cromo (Cr), zinc (Zn), arsénico (As), cadmio (Cd), manganeso (Mn), cobre (Cu), bario (Ba) y níquel (Ni). El plomo, el arsénico y el cadmio no sólo están en la parte alta de la lista sino que también forman parte de las sustancias más tóxicas que se encuentran en las aguas subterráneas. El resto de los top 25 son compuestos orgánicos.

Tabla A3. Los veinticinco contaminantes más frecuentemente detectados en el agua subterránea de lugares con residuos peligrosos

Lugar	Compuesto	Origen
1	Tricloroetileno	Limpiadores en seco, desengrasantes de metales
2	Plomo	Gasolina (hasta 1975), minería, materiales de construcción (tuberías), industria
3	Tetracloroetileno	Limpiadores en seco, desengrasantes de metales
4	Benceno	Gasolina, industria
5	Tolueno	Gasolina, industria
6	Cromo	Cromado de metales
7	Cloruro de metileno	Desengrasantes, disolventes, quitapinturas.
8	Zinc	Industria, minería
9	1,1,1 Tricloroetano	Limpiadores de plásticos y metales
10	Arsénico	Minería, industria
11	Cloroformo	Disolventes
12	1,1 Dicloroetano	Desengrasantes, disolventes
13	1,2 Dicloroetano, <i>trans</i>	Transformación de producto de 1,1,1 tricloroetano
14	Cadmio	Minería, cromado
15	Manganeso	Industria, minería, en la naturaleza como óxido
16	Cobre	Industria, minería
17	1,1 Dicloroetano	Industria
18	Cloruro de vinilo	Industria discográfica
19	Bario	Industria, producción de energía
20	1,2 Dicloroetano	Desengrasantes de metales, quitapinturas
21	Etilbenceno	Fabricación de estireno y asfalto, gasolina
22	Níquel	Industria, minería
23	Di(2-etilhexil)ftalato	Disolventes, gasolina
24	Xilenos	Disolventes, gasolina
25	Fenol	Tratamiento de la madera, medicamentos

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 267

ANEXO 4

Líquidos de fase no acuosa

Muchos de los compuestos orgánicos listados en la Tabla A3 no se disuelven bien en agua. Se denominan líquidos de fase no acuosa (NAPL), y su presencia hace que la tarea de recuperar un acuífero a la calidad de agua potable sea muy difícil o incluso imposible. Los NAPL se dividen generalmente en dos categorías: los que son más densos que el agua, llamados NAPL densos (DNAPL), y los que lo son menos, llamados NAPL ligeros (LNAPL).

Son ejemplos de DNAPL los disolventes clorados tales como el tricloroetileno y tetracloroetileno, los polielorobifenilos (PCB). Pesticidas como el clordano, y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH). Muchos de los LNAPL son hidrocarburos, como el petróleo, la gasolina y el benceno. La Tabla A4 lista algunos NAPL de importancia junto con su solubilidad en agua y su peso específico.

Tabla A4. Líquidos de fase no acuosa

Contaminante	Peso específico	Solubilidad en agua (mg/L)
DNAPL		
Tetracloruro de carbono	1,58	$7,57 \times 10^2$
Tricloroetileno	1,47	$1,10 \times 10^3$
Tetracloroetileno	1,63	$1,50 \times 10^2$
Fenol	1,24	$9,3 \times 10^4$
LNAPL		
Benceno	0,873	$1,75 \times 10^3$
Tolueno	0,862	$5,35 \times 10^2$
<i>p</i> -xileno	0,861	$1,98 \times 10^2$

Fuente: Masters y Ela. Introducción a la Ingeniería Medioambiental. 2008. p: 268

Cuando los LNAPL entran en la zona insaturada, algunos pueden disolverse en agua en los poros, otros pueden evaporarse y acabar mezclados con el aire de los espacios porosos, y otros pueden ser adsorbidos por las partículas del suelo. Cuando alcanzan el

nivel freático no se disuelven bien y se difunden hasta formar una capa de contaminante flotando sobre la superficie de la zona saturada, como se representaba en la Figura 4.4, en la Figura 4.4(a). Los DNAPL también se hunden, se esparcen, adsorben y evaporan en la zona insaturada, pero cuando alcanzan el nivel freático siguen hundiéndose hasta que alcanzan una capa de material relativamente impermeable, donde forman estanques que pueden desbordarse y seguir su curso hasta la siguiente capa impermeable, como se ve en la Figura 4.4(b). Partes de los DNAPL forman pequeños glóbulos que acaban atrapados en los espacios porosos, haciendo virtualmente imposible sacarlos mediante el bombeo. Como quedan alojados en pequeñas fisuras y se acumulan en estanques al fondo de los acuíferos se van disolviendo lentamente al pasar el flujo de agua subterránea. Su solubilidad es tan baja que pueden transcurrir siglos antes de ser completamente arrastrados. Los intentos de eliminar los DNAPL extrayendo agua son completamente vanos.

La Tabla A4 muestra la solubilidad en agua de una selección de NAPL y éstos pueden usarse para hacer una primera estimación del tiempo necesario para eliminar los NAPL por bombeo.

ANEXO 5

GLOSARIO

Acuífero: Es una capa geológica saturada suficientemente permeable para permitir el flujo de agua a su través. Se sienta sobre una base o lecho de confinamiento, que es una capa relativamente impermeable que limita el movimiento del agua.

Aguas subterráneas: Es el agua que circula en la zona saturada de los acuíferos y que es posible de captar por obras de ingeniería.

Aguas superficiales: Son las aguas que discurren por la superficie de la tierra.

Agua vadosa: Agua somera que se encuentra entre la capa freática y la superficie.

Atenuación: Proceso mediante el cual un compuesto reduce su concentración a lo largo del tiempo por adsorción, degradación, dilución y/o transformación.

Botadero: Acumulación inadecuada de residuos sólidos en vías y espacios públicos, así como en áreas urbanas, rurales o baldías que generan riesgos sanitarios y ambientales.

Capilaridad: Es una propiedad de los líquidos que depende de su tensión superficial que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

Desechos sólidos: Es cualquier material sólido acumulado como basura. Por ejemplo, ropa, objetos plásticos, metálicos o cerámicos, latas de bebidas, llantas, poliestireno, poliuretano, materiales de construcción, etc.

Escorrentía superficial: Agua que discurre sobre la superficie del terreno.

Espacios intersticiales: Espacios presentes entre las partículas que conforman el suelo.

Evaluación de Impacto Ambiental: Procedimiento administrativo que sirve para identificar, prevenir e interpretar los impactos ambientales que producirá un proyecto en su entorno en caso de ser ejecutado, todo ello con el fin de que la administración competente pueda aceptarlo, rechazarlo o modificarlo.

Evapotranspiración: Pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

Geoprocesamiento: Es un proceso en el que se aplica el análisis geográfico y se modelan los datos para producir nueva información.

Georeferenciación: Es un neologismo que refiere al posicionamiento con el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas y datum determinado.

Litología: Naturaleza del material geológico que aflora en la superficie.

Lixiviado: Es el líquido que percola a través de los residuos sólidos y que acarrea materiales disueltos o suspendidos. La infiltración de agua de lluvia es el principal generador de lixiviados en los rellenos sanitarios y en los botaderos.

Lloradero: húmeda o salida de agua en un terreno.

Manejo de Recursos Hídricos: Proceso que promueve el desarrollo y el manejo concertado de los recursos hídricos, la tierra y otros recursos relacionados en un territorio, a fin de maximizar el bienestar económico y social que resulta de este proceso de una manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.

Mapas de isopiezas: Refleja la forma de la superficie freática.

Medidas de seguimiento medioambientales: Acciones que se implementarán para prevenir, controlar, corregir o compensar los impactos y efectos ambientales negativos que se causen por el desarrollo de un proyecto.

Método geofísico: Pruebas realizadas para la determinación de las características geotécnicas de un terreno.

Modelo de elevación digital: Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.

Napa freática: Acuífero más cercano a la superficie del suelo.

Nivel piezométrico: Punto concreto de una superficie virtual que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en un acuífero.

Ordenamiento Territorial: Es una normativa, con fuerza de ley, que regula el uso del territorio, definiendo los usos posibles para las diversas áreas en que se ha dividido el territorio, ya sea: el país como un todo, o una división administrativa del mismo.

Partes por millón (ppm): Es una unidad de medida de concentración de una solución. Se refiere a la cantidad de mg (miligramos) que hay en un kg (kilogramo) de disolución.

Perfil litológico: Representa gráficamente la estratigrafía generalizada de un sector.

Pluma de contaminación: Zona del acuífero contaminada que tiene su origen en un foco de contaminación y se extiende aguas abajo de la dirección del flujo. Suele presentar una cierta dispersión.

Pluviometría: Estudio y tratamiento de los datos de precipitación que se obtienen en los pluviómetros ubicados a lo largo y ancho del territorio.

Precipitación: Caída de agua sólida o líquida por la condensación del vapor sobre la superficie terrestre.

Procesos biológicos aerobios: Proceso realizado por un grupo de organismos que permiten la purificación del agua en presencia de oxígeno.

Relleno Sanitario: Instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos en la superficie o bajo tierra, de acuerdo con principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental.

Remediación: Remoción de la contaminación o contaminantes del medio ambiente (suelo, aguas subterráneas, sedimento, etc.) para la protección general de la salud humana y del ambiente.

Riesgo: Peligro de deterioro en la calidad de un acuífero, por la existencia real o potencial de sustancias contaminantes en su entorno.

Sensibilidad de un acuífero a la contaminación: Grado en que un acuífero pueda ser contaminado y depende de las propiedades del suelo, del espesor de la zona no saturada y de su capacidad de atenuación y retención, así como de las propiedades del contaminante.

Viscosidad: Oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales.

Vulnerabilidad de las aguas subterráneas: Naticional Research Council (1993) define vulnerabilidad de las aguas subterráneas como la tendencia o la probabilidad de que los contaminantes puedan llegar a una posición específica en el sistema de aguas subterráneas después de la introducción de contaminantes en algún lugar por encima del acuífero superior.

Zona insaturada: También llamada zona vadosa o zona de aireación, esta comprendida entre la superficie del terreno y el nivel freático del agua en los acuíferos y en ella los poros no están completamente ocupados por agua.

Zona saturada: Zona del subsuelo en la que todos los huecos están ocupados por agua, por debajo del nivel freático.