



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

**MANUAL PARA LA APLICACIÓN
DEL CONCEPTO DE VULNERABILIDAD DE
ACUÍFEROS ESTABLECIDO EN LA NORMA DE
EMISIÓN DE RESIDUOS LÍQUIDOS A AGUAS
SUBTERRÁNEAS.
DECRETO SUPREMO N° 46 DE 2002**

REALIZADO POR:

**DEPARTAMENTO DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN
DE RECURSOS HÍDRICOS**

S.D.T.; N° 170

Santiago, 2004

GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DE CONSERVACION Y P.R.H.



M.O.P.
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
OFICINA DE PARTES
RESOLUCION TRAMITADA
Fecha: 17 MAYO 2004

REF.: Aprueba "Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46 de 2002."

SANTIAGO, 17 MAYO 2004
D.G.A. N° 599

VISTOS: El D.S. N° 46 que establece la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, de fecha 08 de Marzo de 2002; el "Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46 de 2002" y las atribuciones que me confiere el artículo 300 letra c) del Código de Aguas.

RESUELVO: (EXENTA)

1°.- APRUEBASE el Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N° 46 de 2002.

2°.- PUBLIQUESE, la presente Resolución en el Diario Oficial de la República acorde a lo previsto en el artículo 4°, n°14 del D.S. N° 46 de 2002.

3°.- COMUNIQUESE la presente resolución al Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Departamento de Estudios y Planificación, Departamento de Hidrología, Departamento de Conservación y P.R.H., Departamento Legal y al Centro de Información de Recursos Hídricos; a las Direcciones Regionales de Aguas, a la Comisión Nacional del Medioambiente, a la Superintendencia de Servicios Sanitarios y las demás oficinas que correspondan.

ANOTESE, COMUNIQUESE Y PUBLIQUESE



M.O.P.
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DPTO. CONSERVACION Y P.R.H.
FECHA: 11 MAYO 2004
PROCESO N° 81186 WJ

HUMBERTO PEÑA TORREALBA
INGENIERO CIVIL
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

Director General de Aguas
Ing. Sr. Humberto Peña Torrealba

Jefa Depto. de Conservación y Protec. de Rec. Hídricos
Ing. Sra. Mesenia Atenas Vivanco

Profesional del Depto.
Ing. Sr. Alejandro Muñoz Monari

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este documento no habría sido posible sin la ayuda de las siguientes personas e instituciones, por lo tanto el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, agradece la colaboración de:

Gonzalo Lobos, José Luis Antinao, Rita Arqueros, Fabian Helms, Igor Aguirre, Sergio Iriarte, Marcela Venegas, Arturo Hauser, Damaris Orphanópoulos, Dalia Chiu y José Luis Arumí, así como también al SERNAGEOMIN, BGR, SISS y OIEA.

PRÓLOGO

Desde la promulgación de la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente en 1994 y la entrada en vigencia del Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión en 1996, el país ha desarrollado un grupo de normas de Emisión relacionadas con los recursos hídricos.

Es así como surge, en el año 2002, la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, D.S. N°46, que tiene como objeto prevenir la contaminación de las aguas subterráneas, mediante el control de la disposición de los residuos líquidos que se infiltran a través del subsuelo al acuífero, contribuyendo así a mantener la calidad ambiental de las aguas subterráneas.

La Dirección General de Agua dando cumplimiento a lo establecido en el D.S. N° 46, y velando por mantener la calidad físico-química de los recursos almacenados en los acuíferos de nuestro país, ha desarrollado el presente trabajo denominado “Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas D.S. N°46”

El presente Manual recoge la experiencia en materia de aguas subterráneas y entrega una metodología que permitirá determinar la vulnerabilidad de acuíferos expuestos a emisiones de residuos líquidos mediante obras de infiltración, la que dependerá de las condiciones locales y del volumen a infiltrar, entre otros factores.

Este documento ha sido realizado por el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, considerando la opinión de otras instituciones vinculadas al tema como el Servicio Nacional de Geología y Minería, Superintendencia de Servicios Sanitarios, entre otros, quienes a través de sus profesionales han entregado sus aportes sobre la materia.

RESUMEN

En este manual se entregan las definiciones de los principales conceptos utilizados en el tema de vulnerabilidad de acuíferos y sus limitaciones.

El método elegido corresponde al denominado BGR, que fue desarrollado en Alemania, sin embargo cabe destacar, que en este manual esta metodología ha sido modificada para que sea aplicable a infiltraciones intencionales, ya que originalmente fue desarrollada para evaluar situaciones en que la recarga estuviese dada solo por lluvia, por lo que nos referiremos a él como BGR-modificado.

Además, se detallan las instrucciones generales para determinar la vulnerabilidad de acuíferos, siguiendo la metodología, exponiendo los parámetros utilizados y la forma de evaluarlos. Dentro de los parámetros asociados tanto a la emisión misma como a las características de la zona de infiltración se tiene: la capacidad de campo efectiva del suelo, la litología de la zona no saturada sobre el acuífero, la profundidad del nivel freático, la recarga tanto natural como artificial, la forma de realizar la infiltración, etc.

El método se basa en asignar puntajes a los diversos parámetros, los que mediante una fórmula se traducen en un puntaje total, que indica el grado de protección del acuífero, bajo las condiciones de infiltración. Finalmente, este puntaje se correlaciona, a través de una tabla, con la vulnerabilidad del acuífero, teniendo que una alta protección del acuífero equivale a una vulnerabilidad baja del mismo.

En el manual se identifican dos casos dependiendo del grado de información que disponga el titular para la determinación de la vulnerabilidad en la zona de interés. Además y a modo de aplicación de la metodología se incluyen varios ejemplos de cálculo de la vulnerabilidad y las referencias utilizadas.

Este Manual para la Aplicación del Concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en dicho Decreto, fue aprobado por Resolución DGA N° 599 del 17 de Mayo de 2004.



INDICE

Agradecimientos

Prólogo

Resumen

1. Objetivo	1
2. Definiciones	1
3. El Concepto de Vulnerabilidad y sus Limitaciones.....	5
4. Instrucciones Generales para la Determinación de la Vulnerabilidad de Acuíferos	6
4.1. Evaluación de Parámetros	7
4.1.1. En relación con el Suelo y la Recarga.....	7
4.1.2. En relación con la Litología de la Zona no Saturada Bajo el Suelo.....	9
4.2. Determinación de la Efectividad de Protección Generalizada	15
4.2.1. Cobertura de Suelo (Puntaje P1)	15
4.2.2. Cubierta Litológica en la Zona no Saturada (Puntaje P2)	16
4.2.3. Cobertura del Suelo más cubierta Litológica (Puntaje Pt)	16
4.3. Determinación de la Vulnerabilidad.....	16
5. Instrucciones Específicas para la Determinación de la Vulnerabilidad de Acuíferos	17
5.1. Casos Tipo	18
5.1.1. Caso 1	18
5.1.2. Caso 2	20
6. Ejemplos	20
7. Referencias.....	24
8. Anexos	25
8.1. Anexo 1 - Utilización de Diagramas Triangulares	25
8.2. Anexo 2 - Determinación de la Capacidad de Campo Efectiva (CCE)	26
8.3. Anexo 3 - Test de Confiabilidad	30
8.3.1. La efectividad de protección de 1.0 m de arcilla corresponde a:.....	30
8.3.2. Comparación de la efectividad de protección de diferentes tipos de estratos	31



1. Objetivo

El presente manual tiene como objetivo entregar un procedimiento estandarizado para la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos con el fin de aplicar este concepto en la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas.

Los titulares de los proyectos que infiltren (fuentes existentes) o requieran infiltrar (fuentes nuevas) los efluentes de sus procesos y que sean considerados fuentes emisoras de acuerdo al D.S. N°46, deberán presentar un informe con la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos de acuerdo a este manual. La Dirección General de Aguas (DGA) visará los informes y se pronunciará respecto de la vulnerabilidad del acuífero mediante una resolución.

Cabe hacer presente que la metodología para determinar vulnerabilidad de acuíferos descrita en este manual ha sido simplificada con la finalidad de que pueda ser asimilada por un lector no experto en el tema.

2. Definiciones

Actividad Biológica: La actividad biológica representa todos los procesos naturales propios de la vida, tanto de la fauna, como de la flora, como también de los microorganismos. Estos procesos interesan en relación con el suelo, porque pueden afectar algunas de sus propiedades, como contenido de gases, densidad, textura, color, cohesión, permeabilidad.

Acuífero: Formación geológica (no consolidada o consolidada), permeable susceptible de almacenar agua en su interior y ceder parte de ella.

Acuífero Confinado: Es aquel en que el agua alojada en la zona saturada se encuentra a una presión mayor que la atmosférica.

Acuífero Libre: Es aquel en que el agua de la zona saturada se encuentra a presión atmosférica por estar en contacto directo con la atmósfera a través de los espacios de la zona no saturada.

Adsorción: Adhesión superficial de sustancias o moléculas sobre algún material, en que los componentes no llegan a mezclarse. La sustancia que se adsorbe se denomina “adsorbato” y el material sobre el que lo hace es el “adsorbente”.



Agua Subterránea: Está definida en el artículo 2, inciso final del Código de Aguas. Es el agua que se encuentra en el subsuelo, ocupando los espacios porosos o fracturas de los materiales geológicos.

BGR: Siglas del método alemán para determinar la vulnerabilidad de acuíferos desarrollado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR).

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): es la cantidad total de cationes que puede adsorber un suelo y se expresa en miliequivalentes por 100gr.

Capacidad de Campo: Corresponde al porcentaje de humedad, en peso, que tiene el suelo después de drenar por acción de la gravedad. También puede ser definida como el porcentaje de humedad de un volumen dado de suelo que ha sido sometido a una tensión de 1/3 de atmósfera.

Capacidad de Campo Efectiva Unitaria (CCEU): corresponde a la humedad de un volumen dado de suelo disponible para la vegetación. Solo se aplica a suelos finos (arenas, limos, arcillas), pues los suelos gruesos (gravas, gravillas, etc.) no tienen capacidad de retención. Es la diferencia entre el % de agua, en el suelo, que resiste a una succión de 1,8 pF ($10^{1.8}$ hPa) y el % de agua que resiste a una succión de 4,2 pF ($10^{4.2}$ hPa). Se mide en mm/décimetro de suelo o en %, lo que es equivalente.

Capacidad de Campo Efectiva (CCE): corresponde a la capacidad de campo efectiva unitaria multiplicada por el espesor de suelo correspondiente. Tiene unidades de longitud (mm).

Condición Artesiana: estado del agua subterránea confinada bajo condiciones de presión hidrostática, en el cual el nivel piezométrico sobresale de la superficie del terreno. Si una captación se encuentra bajo presión artesiana, esta descargará directamente sobre la superficie.

Densidad Efectiva de Depositación (Dd): es el peso específico del suelo seco en su estado original (no expandido por excavación) medido en gr/cm³. También se le llama Densidad Aparente del suelo.

Depósito Sedimentario: Materiales sedimentarios acumulados en la superficie de la corteza terrestre transportados por los diferentes agentes tales como: ríos, viento, hielo, gravedad, etc.

Efectividad de Protección: nivel o grado de protección, expresado en forma de puntaje, de la zona saturada del suelo frente a infiltraciones. Se estima mediante métodos de determinación de vulnerabilidad.



Evapotranspiración Potencial: Es la evapotranspiración que ocurriría si la disponibilidad de humedad en el suelo no estuviera limitada.

Hidrogeología: Es la ciencia que estudia el comportamiento, ocurrencia y distribución de las aguas subterráneas.

Infiltración: Introducción del flujo de agua por los poros del suelo o subsuelo hacia el suelo o subsuelo.

Karst (Kárstico): Sistema de rocas calcáreas que han sufrido un proceso de dilución por acción del ácido carbónico disuelto en el agua y los cambios de temperatura.

Materia Orgánica: se refiere a los restos y residuos producidos por organismos vivos tanto vegetales como animales, incorporados al suelo, que pueden ser identificables o no, del tipo de humus, entre otros. La materia orgánica tiene efectos sobre las características físicas, químicas y biológicas del suelo, como capacidad de retención de agua, formación de agregados, aireación, aporte de nutrientes y micronutrientes y fuente de energía para organismos vivos.

Meteorización: Proceso o grupo de procesos mediante los cuales agentes físicos, químicos y biológicos destruyen materiales de roca o suelos expuestos, lo que se manifiesta como cambios de color, textura, composición o forma, con transporte escaso o nulo de los materiales sueltos o alterados.

Nivel Freático: Cota o nivel de saturación del agua de un acuífero libre medido desde la superficie del suelo. Es el límite superior del agua subterránea. En acuíferos libres corresponde a la superficie superior de los puntos en los cuales la presión en el agua subterránea es igual a la atmosférica.

Nivel piezométrico: En el caso de acuíferos libres coincide con el nivel freático. En el caso de acuíferos confinados corresponde al nivel al que se eleva el agua al interior de una captación por efecto de la presión del agua al interior del acuífero.

Percolación: Es el movimiento descendente del agua a través de la zona no saturada del suelo.

Permeabilidad: Propiedad de los terrenos porosos y permeables de dejar pasar el agua siguiendo las leyes hidrostáticas. Es el volumen de agua que deja pasar una formación geológica a través de una sección en un tiempo determinado, es decir tiene unidades de velocidad. La permeabilidad depende de la geometría del medio (tamaño de los granos, coeficiente de uniformidad y porosidad), y de las propiedades del fluido (peso específico y viscosidad dinámica)



Permeabilidad Intrínseca: Es la propiedad del suelo y/o subsuelo, de permitir el paso de un fluido a través de sus poros bajo la acción combinada de la gravedad y la presión, expresada en forma independiente del fluido que lo atraviesa. Se expresa solamente en función de las características del suelo y/o subsuelo: algún diámetro representativo del suelo, coeficiente de uniformidad si corresponde, y porosidad eficaz.

Porosidad: Es la relación existente entre el volumen de los intersticios porosos con respecto al volumen total de la roca o suelo. La porosidad se expresa en porcentaje.

Precipitación Efectiva: Corresponde a la precipitación total caída menos el escurrimiento superficial asociado a ella.

Presión Hidráulica: Presión ejercida por el agua en cualquier punto. En relación con el agua subterránea, se habla de la presión que ejerce el agua a través de un medio poroso o fracturado.

Profundidad Efectiva: Corresponde al grosor de las capas de suelo y subsuelo en las cuales las raíces pueden penetrar sin dificultad en busca de agua, nutrientes y sostén. Se mide en función de la existencia de un impedimento que limita en forma absoluta y permanente la penetración de raíces, sin incluir las grietas que pudieran encontrarse bajo los estratos.

Recarga de un Acuífero: La recarga de un acuífero corresponde a la cantidad de agua que ingresa al acuífero desde una fuente externa (generalmente por infiltración desde la superficie o desde otro sistema acuífero).

Sapropel: Lodos arcillosos con restos orgánicos, derivados de plantas y animales que se forman en las orillas de los lagos, estuarios y en los bordes litorales.

Subsuelo: Capa que se encuentra bajo el suelo y en la cual no hay actividad biológica.

Suelo: Capa superior de la superficie terrestre, formada en un proceso de miles de años, en el que han intervenido el clima, la topografía, la vegetación y los microorganismos. En esta capa se realiza la actividad biológica, por lo que a veces se le llama suelo orgánico. En el método BGR, se asume que esta capa no tiene más que un metro de espesor.

Superficie de infiltración: es aquella a través de la cual se introduce un líquido al suelo o al subsuelo.



Textura: Es una expresión sintética de las características de cada horizonte de suelo o subsuelo en función del tamaño de las partículas. Se consideran en la textura todos aquellos fragmentos menores que 2 mm de diámetro. Las combinaciones posibles en los porcentajes de arcilla, limo y arena, pueden agruparse en unas pocas clases de tamaño de partículas o clases texturales, ej : Textura franca arenosa (indica claramente que predomina la fracción arenosa), limo-arcillosa, arcillo-limosa, etc.

Unidad Litológica: Formación rocosa en la cual diversos tipos de roca tienen características similares en cuanto a su estructura y a su composición mineralógica o química.

Vulnerabilidad Intrínseca de un Acuífero: La vulnerabilidad intrínseca de un acuífero dice relación con la velocidad con la que un contaminante puede alcanzar hasta la zona saturada del subsuelo. Una mayor rapidez de migración de la contaminación a través de la zona no saturada del subsuelo será entendida como mayor vulnerabilidad de éste.

Zona No Saturada: Corresponde a aquella parte del subsuelo donde los poros no se encuentran ocupados completamente con agua.

Zona Saturada: Corresponde a aquella parte del subsuelo que se encuentra con sus poros ocupados completamente por agua. Esta parte del subsuelo se denomina acuífero.

3. El Concepto de Vulnerabilidad y sus Limitaciones

La literatura técnica (Ground Water Vulnerability Assesment, 2000) indica que la vulnerabilidad se puede definir como el nivel de penetración con que un contaminante alcanza una posición específica en un sistema acuífero, después de su introducción en alguna posición sobre la zona no saturada. Por otro lado, el riesgo de contaminación está determinado básicamente por las características del acuífero, las que son relativamente estáticas (es decir, permanentes a escalas razonables de tiempo) y por la existencia de actividades potencialmente contaminantes, las que son esencialmente dinámicas.

Existen diversas metodologías para la determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos. Dichos métodos difieren en los parámetros utilizados para su determinación, parámetros como por ejemplo: características de la zona no saturada, profundidad del agua subterránea, recarga neta, permeabilidad del subsuelo, etc. Existen métodos que utilizan un número importante de parámetros, mientras que otros están basados en un número muy reducido. En la práctica, la



utilización de un método u otro queda determinada, fundamentalmente, por la disponibilidad de información.

Debe hacerse notar que el concepto de vulnerabilidad no ha sido desarrollado para la protección de acuíferos ante infiltraciones intencionales, como ha sido utilizado en la norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, sino que ha sido, esencialmente, utilizado como instrumento de contribución al ordenamiento territorial. Sin embargo, aun reconociendo las limitaciones de dicho concepto, se ha optado por incorporarlo como una herramienta en la protección de los recursos hídricos subterráneos.

Para efectos de la aplicación de este manual se prohíben las infiltraciones a presión, es decir, aquellas en que de alguna manera se presiona o se fuerza al agua para introducirla entre los poros del suelo o del subsuelo.

4. Instrucciones Generales para la Determinación de la Vulnerabilidad de Acuíferos

A continuación se presentan las instrucciones generales para la determinación de la vulnerabilidad de un acuífero, con el fin de aplicar este concepto a la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas.

En primer término se debe señalar que, sin desconocer la existencia de otros métodos para determinar vulnerabilidad, en este manual se ha optado por el método desarrollado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) en conjunto con los Servicios Geológicos Federales de Alemania. Dicha elección se fundamenta en el número razonable de parámetros que utiliza y la facilidad para obtenerlos, en relación con otras metodologías, y además por la experiencia que tiene el Servicio Nacional de Geología y Minería con este método en nuestro país.

El método BGR adopta un compromiso entre la eficacia que presenta para evaluar la vulnerabilidad de un modo adecuado, versus la cantidad de información necesaria para realizarlo. Es relativamente barato, pues en su forma básica requiere esencialmente información existente. Originalmente el método fue desarrollado para evaluar lo que ocurriría en un acuífero ante un eventual ingreso de agua como parte de recarga por lluvia, por lo que es sólo una estimación de lo que ocurre con ingresos intencionados. Debido a esto, para efectos de este manual, se ha modificado el método original considerando además de la recarga natural por lluvia, la recarga artificial debida a la propia descarga contaminante.



El método combina, mediante un esquema de rating o puntaje, cuatro factores relevantes que determinan o influyen en la rapidez con la que una determinada sustancia alcanza el acuífero, suponiendo una infiltración desde un sector en la superficie o cercano a ella. Dichos factores son:

- a) la capacidad de campo efectiva del suelo (ocupado por organismos vegetales), atravesado por el contaminante,
- b) el monto de la recarga natural al acuífero, dada por la precipitación efectiva, y de la recarga artificial dada por la infiltración misma,
- c) la litología, es decir el tipo de sedimentos o rocas presentes en la zona no saturada, atravesada por el contaminante,
- d) y el espesor de la zona no saturada atravesada por el contaminante antes de alcanzar el acuífero.

A cada uno de estos factores se les asocia un puntaje, los cuales ponderados y sumados entre sí, dan como resultado un valor que se traduce en vulnerabilidad. Esta metodología se explica detalladamente en el siguiente punto.

Con la finalidad de hacer lo más conservador posible el cálculo de la vulnerabilidad, el nivel freático que se deberá considerar, en caso de que exista estadística, será el nivel histórico más cercano a la superficie. En caso de que no exista estadística, habrá que realizar mediciones del nivel freático en la época del año en que se presentan los niveles más altos de la napa. Por otra parte, la profundidad a considerar será desde el punto inferior de emisión (punto de emisión) hasta el nivel freático.

4.1. Evaluación de Parámetros

A continuación se describe la evaluación de cada uno de los parámetros que requiere el método BGR para determinar la vulnerabilidad de un acuífero.

4.1.1. En relación con el Suelo y la Recarga

Parámetro 1: Capacidad de Campo Efectiva (puntaje S)

En el caso que la emisión se realice hacia un suelo, se debe evaluar la Capacidad de Campo Efectiva (CCE) de dicho suelo. La Capacidad de Campo Efectiva Unitaria (CCEU) medida en mm/dm se debe determinar para cada horizonte de suelo individual, por medidas hechas en terreno, analizadas en el laboratorio o con la ayuda de tablas estándar de manuales de mapeo de suelos (ver Anexo 2). La CCEU se multiplica luego por el espesor del horizonte en decímetros (dm). La capacidad de campo efectiva total del suelo (Σ CCE) se obtiene mediante la suma de los valores calculados para cada horizonte hasta 1 metro de profundidad (o hasta el



nivel freático, si éste es menor que un metro bajo la superficie del terreno). Para suelos someros, la CCE del substrato bajo la zona de suelo es igualmente evaluada hasta una profundidad de un metro e incluida en el cálculo.

El método asigna un puntaje S a la capacidad de campo efectiva total. Esta se subdivide en 6 clases y a cada una de estas se le otorga un puntaje. Un mayor puntaje corresponde a una capacidad de campo más alta, y por ende a un tiempo de residencia comparativamente largo del agua que percola (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Evaluación de los suelos sobre la base de la capacidad de campo efectiva (CCE)

S CCE (mm) hasta 1,0 m de profundidad	Puntaje S
≥ 250	750
200 – 249	500
140 – 199	250
90 – 139	125
50 – 89	50
= 49	10

Los valores de la CCE referidos aquí (ver tabla 8.2 del Anexo 2), son comparativamente desfavorables para los suelos arcillosos. Si bien estos suelos permiten un mayor tiempo de residencia del agua que percola, lo que produciría una mayor protección del acuífero, esta característica de clasificación desfavorable se justifica debido a que las arcillas frecuentemente presentan grietas de desecación regulares, que tienden a acelerar la migración de contaminantes.

Dentro de este esquema, la efectividad de protección del suelo, en general, se evalúa más desfavorablemente para tomar en cuenta el efecto de macroporos, que dan lugar a variaciones considerables de pequeña escala.

Por último se debe mencionar que si la infiltración realizada requiere remover la cobertura de suelo vegetal o se realiza a una profundidad mayor que el espesor total del suelo, este puntaje no deberá ser considerado.

Parámetro 2: Tasa de Percolación o Recarga (Factor R)

La recarga total se constituye de dos términos independientes que se suman entre sí, estos son la Recarga Natural (RN) y la Recarga Artificial (RA).

Recarga natural:

A pesar de que es posible obtener mediante mediciones la recarga natural anual de aguas subterráneas (RN), generalmente esta información no estará disponible, debido a lo cual ésta se estima (RNest) mediante la diferencia entre la precipitación



anual (P) y la evapotranspiración potencial anual (ETPpot). Para mantenerse por el lado de la seguridad no se tomará en cuenta el efecto de la pendiente, lo que significa que el cálculo se hace bajo la suposición de una superficie del terreno casi horizontal.

Recarga Artificial:

Corresponde al volumen anual de infiltración. Este debe ser expresado en mm/año, considerando la superficie de infiltración de la descarga. Entonces:

$$RA = \text{Volumen total anual de infiltración} / \text{superficie de infiltración} \quad (\text{mm/año})$$

El método asocia un factor R al valor de la recarga total, según la Tabla 4.2. Recargas mayores tienen puntajes menores porque significan un menor grado de protección del acuífero.

Tabla 4.2 Valoración de la Recarga (Factor R)

R para RN medida		R para RN estimada	
RN + RA [mm/a]	Factor R	RNest + RA [mm/a]	Factor R
≤ 99	1,75	≤ 99	1,50
100 - 199	1,50	100 - 199	1,25
200 - 299	1,25	200 - 299	1,00
300 - 399	1,00	300 - 399	0,75
≥ 400	0,75	≥ 400	0,50

En este punto cabe hacer presente que en caso de que la infiltración se realice cerca o al interior de una zona de recarga (zona de riego), se deberá estimar el aporte producto de la zona y sumarse a las recargas debidas a los procesos antes descritos, para ser considerada en el cálculo de la recarga total.

4.1.2. En relación con la Litología de la Zona no Saturada Bajo el Suelo

La efectividad de la protección que provee la zona no saturada bajo el suelo, es decir desde una profundidad estándar de 1 m bajo la superficie del terreno (en el caso que la infiltración sea superficial) o desde el punto de infiltración hasta el nivel freático (o hasta el techo del acuífero, en el caso de un acuífero confinado), se calcula para cada estrato separadamente. Los puntajes de todos los estratos en la sección se suman finalmente para obtener el puntaje total. La efectividad de protección de la zona no saturada bajo el suelo depende de varios parámetros, los cuales son evaluados como sigue:



Parámetro 3: Tipo Litológico (puntaje L)

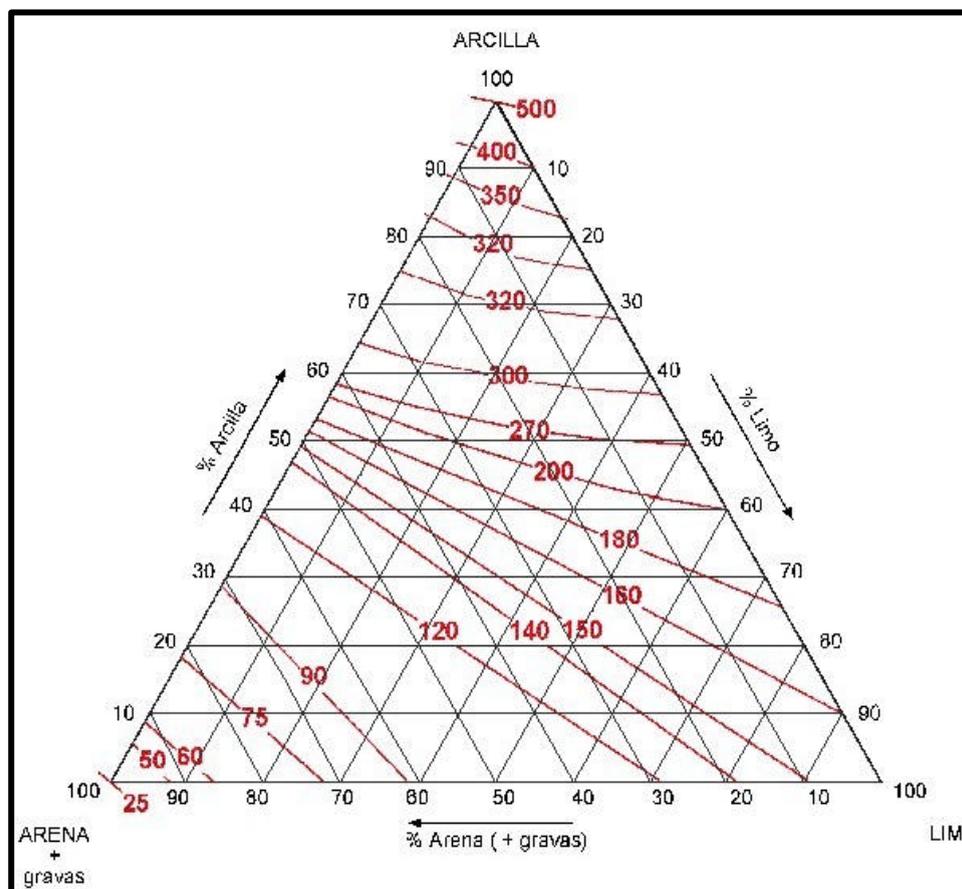
Debido a sus propiedades hidrogeológicas diferentes, se evalúan separadamente los depósitos no consolidados (caso a) y los depósitos consolidados (caso b). A este parámetro se le asocia un puntaje L para evaluar la vulnerabilidad del acuífero.

Caso a) Depósitos no consolidados (Puntaje Ln)

En el caso de los depósitos no consolidados, una estimación del tiempo de residencia se deriva a través de su relación con la capacidad de intercambio catiónico (CIC), dado que ambos factores dependen directamente de la cantidad de material fino presente. La CIC es fácilmente cuantificable, debido a que puede ser obtenida de tablas. Cuando el sistema contiene material más grueso, el cual tiene una CIC despreciable, se debe estimar el tiempo de residencia del agua que está infiltrando aun cuando este tiempo sea corto, considerando la velocidad de infiltración igual a la permeabilidad (Ley de Darcy). Para efectos del método el tiempo de residencia se asocia a un puntaje L, el cual se denomina Ln para a los depósitos no consolidados, y se estima sobre la base de la CIC para cada uno de los diferentes tipos de depósitos no consolidados (Hölting et al., 1995).

La manera de obtener el puntaje Ln a partir de las descripciones litológicas, se muestra en las figuras siguientes:

Figura 4.1 Estimación del Puntaje (Ln, números en rojo) para Depósitos no Consolidados en Método de Cálculo de Vulnerabilidad a partir de proporciones granulométricas. Triángulo de clasificación para el caso en que los materiales finos superen el 50% del total.



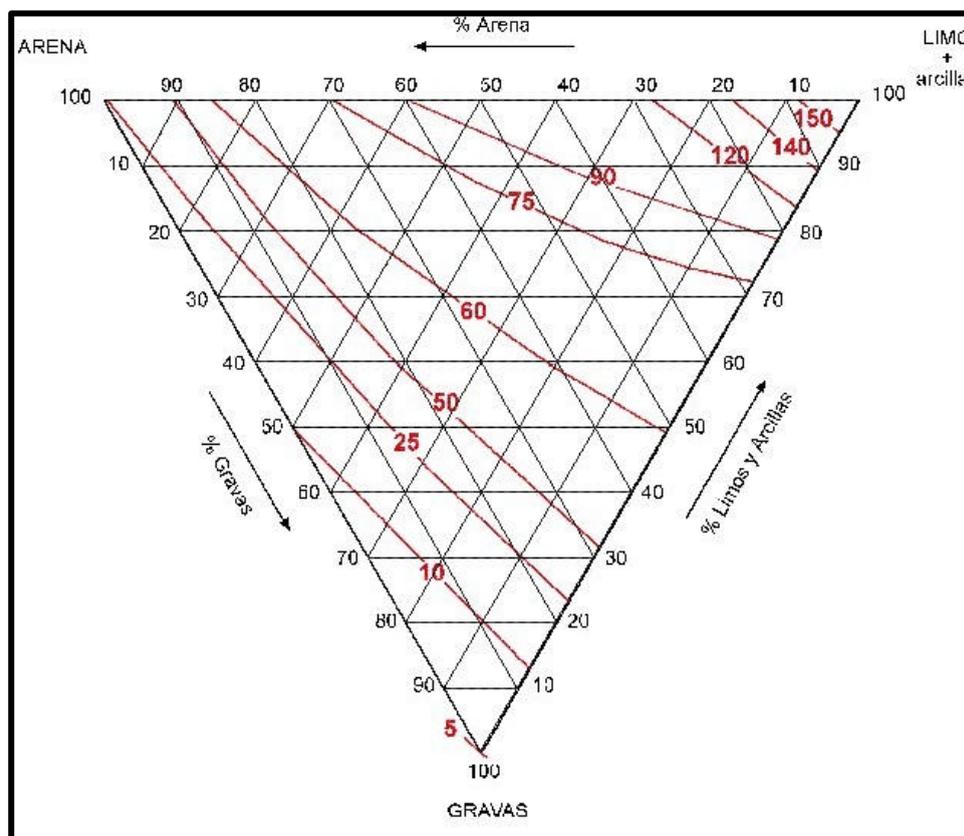
El puntaje Ln (puntos por metro de litología), se obtiene ubicando la posición en el triángulo de acuerdo con las proporciones estimadas o medidas de los componentes definidos en las figuras N°4.1 o N°4.2 (ver Anexo 1 para la utilización de las figuras N°4.1 y N°4.2). Por lo tanto, debe estimarse o medirse la proporción de cada componente en el total.

Para depósitos en que más del 50% corresponde a granulometría bajo 1/16 mm se debe usar la Figura N° 4.1 (arena-limo-arcilla). En caso de que existan gravas, estas deben agregarse al porcentaje de arenas.

Por el contrario, para granulometrías en que más del 50% del depósito esté sobre 1/16 mm, se debe utilizar Figura N° 4.2 (grava-arena-limo). En el caso de que se presenten arcillas, el porcentaje de estas debe agregarse al de limos.



Figura N° 4.2 Estimación del Puntaje (Ln, números en rojo) para Depósitos no Consolidados en Método de Cálculo de Vulnerabilidad a partir de proporciones granulométricas. Triángulo de Clasificación para el caso en que los materiales gruesos superen el 50%.



Para los casos en que no se conocen las proporciones de los componentes y sólo se cuenta con descripciones estratigráficas (sin proporciones o porcentajes estimados), se debe utilizar la Tabla N° 4.3. Dicha tabla se encuentra adaptada para los sedimentos no consolidados que se describen en el presente método, con puntajes asociados, y para algunas de las equivalencias encontradas comúnmente en las descripciones estratigráficas de sondajes.

Tabla 4.3 Equivalencias Litológicas para Descripciones Estratigráficas Comunes de Sondajes y puntajes asociados para la evaluación de Ln.

Depósitos no consolidados	Equivalencias	Término comúnmente por MINAGRI	Puntaje Ln
Arcilla			500
Arcilla poco limosa	Arcilla-Limo, Arcilla fangosa	Arcillo limosa liviana	400
Ceniza fina			400
Turba		Turba	300
Sapropel		Saprolito	300
Limo	Limo-Arcilla, Limo arcilloso, Limo cementado		300



Arcilla arenosa	Arcilla-Arena, Limo arenoso, Limo-Arena, Arcilla-limo-arena	Arcillo arenosa pesada	270
Arcilla con grava	Arcilla con Bolones o Ripio, Limo arenoso con Grava o Bolones o Ripio, Arcilla arenosa con Grava o Bolones o Ripio, Arcilla-Arena-Grava o Bolones o Ripio, Arcilla-Grava o Ripio, Limo-arena-arcilla		200
Ignimbrita semiconsolidada	Pumicita, liparita, cinerita		200
Ceniza gruesa			200
Arena arcillosa	Arena-Arcilla, Arena-Arcilla (>20%) - arena, Arena-Limo, "cancagua" Arena limosa , Arena cementada, Arena-arcilla-limo	Franco areno fino	140
Grava arcillosa arenosa	Ripio o Grava o Bolones-Arcilla (>20%), Bolones o grava limo-arcilla		75
Grava arenosa arcillosa	Grava - Arena - Arcilla ($\leq 20\%$), Bolones o Ripio o Grava arenosa-poca Arcilla Arena arcillosa ($\leq 20\%$), Ripio-Arcilla-Arena, arena-arcilla-grava Arena con Grava poco limo		50
Tefra de lapilli	Manto de lapilli, Gravilla volcánica, "chicharrones", "piedra pómez"		50
Arena	Arena con grava fina, Arena con piedrecilla o gravilla, Arena-arcilla-bolones o grava	Arenosa	25
Grava arenosa	Ripio-Arena, Bolones o Ripio arenoso, Gravilla		10
Grava	Bolones o Ripio, Roca, Bloques, Grava-Bolones -Ripio	Sustrato de ripio abierto	5

"-" separador de los componentes de un suelo equivalente en orden jerárquico de izquierda a derecha

"," separador de opciones de suelos equivalentes

MINAGRI: Ministerio de Agricultura de Chile

Se pueden presentar los siguientes casos:

- Si aparecen depósitos salinos en un porcentaje mayor a 25% de la litología analizada, ésta se considerará con un puntaje 5.
- Si el depósito contiene cantidades visibles de materia orgánica, el número de puntos se incrementarán un 75% por metro de espesor (no aplicable a turba y sapropel).



- Si el contenido de materia orgánica es visiblemente elevado, 75 puntos se añaden por metro de espesor.
- Debido a la presencia de grietas profundas de desecación, los depósitos superficiales ricos en arcillas y limos, de hasta 3 m de espesor que descansen sobre rocas permeables que no contengan aguas subterráneas, son tratados como arcillolitas moderadamente fracturadas (ver tabla N° 4.4).

Caso b) Rocas consolidadas (Puntaje Lc)

Las rocas, a pesar de que su permeabilidad primaria en su mayor parte es muy baja, frecuentemente muestran alguna permeabilidad secundaria debido a fracturamiento, meteorización y/o karstificación, y así, presentan tiempos de residencia comparativamente cortos para el agua que percola a través de ellas. Por lo tanto el puntaje L, denominado Lc para este caso, se determina como el producto de los siguientes 2 factores:

- 1) El factor TR asociado al tipo de roca y que refleja la permeabilidad intrínseca de esta,
- 2) el factor F que refleja la presencia de fracturas, cavidades kársticas, etc.

Los puntajes dados a ambos factores aparecen en la Tabla N° 4.4 y se aplican a rocas consolidadas que sólo están ligeramente meteorizadas. Las rocas muy meteorizadas deberían tratarse como si fueran depósitos no consolidados (Tabla N° 4.3)

Tabla 4.4 Evaluación del Puntaje de Rocas (Lc)

Tipo de Roca	TR
Arcillolita, pizarra, marga, limolita	20
Arenisca fuertemente cementada poco porosa, cuarcita, roca volcánica, roca plutónica, roca metamórfica	15
Arenisca porosa, roca volcánica porosa (Ej: toba, lava brechosa, etc.)	10
Conglomerado, brecha, caliza, caliza tobácea, dolomita, yeso	5
Fracturamiento y Otras Estructuras Geológicas	F
No fracturada	25
Levemente fracturada	4
Moderadamente fracturada, levemente cárstica	1
Moderadamente cárstica	0,5
Fuertemente fracturada, fracturada o fuertemente cárstica	0,3
No conocida	1



Parámetro 4: Espesor de la Zona no Saturada (Factor E)

La distancia atravesada por el agua que percola (suponiendo percolación vertical), es decir, el espesor del suelo y roca entre la infiltración y el acuífero superior, afecta el tiempo de residencia y así durante este tiempo de percolación, el agua está expuesta a procesos mecánicos, físico químicos y microbiales. Al evaluar la efectividad de protección, el espesor de cada estrato en metros es usado como factor en el cálculo correspondiente.

Parámetro 5: Condiciones Artesianas (puntaje extra A)

Las condiciones de presión hidráulica dependen, entre otras cosas, de la litología de la cobertura de rocas y suelo sobre el acuífero, que ya ha sido tomada en cuenta por los puntos entregados por cada tipo de roca. No obstante, la presencia de condiciones artesianas (acuíferos confinados) permanentes es particularmente efectiva como una protección natural contra la percolación de agua contaminada en el acuífero. Por lo tanto se otorga en este caso un puntaje extra A de 1500 puntos.

4.2. Determinación de la Efectividad de Protección Generalizada

Para determinar la vulnerabilidad de un acuífero, según el presente método, primero se debe calcular la efectividad de protección generalizada.

Para determinar la efectividad de protección generalizada (puntaje P_t) del suelo y rocas entre el punto de infiltración y el acuífero superior, se calculan separadamente las efectividades de protección del suelo (puntaje P_1) y de la cobertura litológica (puntaje P_2).

4.2.1. Cobertura de Suelo (Puntaje P_1)

El puntaje S dado por la CCE del suelo (en caso que la infiltración se haga dentro de la cobertura de suelo de 1 m de espesor) obtenido de la Tabla N° 4.1 se multiplica por el factor R , que representa la tasa de percolación (Tabla N° 4.2), obteniéndose el puntaje P_1 .

$$P_1 = S \times R \quad (1)$$

Si la infiltración se hace bajo el suelo, $P_1=0$.



4.2.2. Cubierta Litológica en la Zona no Saturada (Puntaje P₂)

Según se explicó antes, a cada estrato individual en la zona no saturada, bajo el suelo (bajo 1 metro de profundidad o desde el punto de infiltración) y sobre el acuífero, se le asigna separadamente un puntaje: en el caso de depósitos no consolidados el puntaje L_n usando las figuras N°4.1, N°4.2 o la Tabla N° 4.3 según corresponda, y en el caso de roca sólida el puntaje L_c usando la Tabla N° 4.4; luego el puntaje es multiplicado por el espesor estratigráfico en metros (factor E). La suma de todos los puntos para las unidades de roca individuales, es decir, el tramo desde 1 m bajo la superficie o desde el punto de infiltración, hasta el nivel freático (al techo del acuífero en el caso de un acuífero confinado), da una cifra que representa la efectividad de protección de la cobertura litológica en la zona no saturada bajo el suelo. Esta cifra, como en el caso de la cubierta de suelo, es multiplicada por el factor R (de la Tabla N° 4.2), que representa la tasa de percolación.

Si es aplicable, se agrega el puntaje adicional (A) por condiciones artesianas.

El puntaje P_2 que representa la efectividad de protección de la cobertura litológica en la zona no saturada, bajo el suelo, se calcula como sigue:

$$P_2 = R \times (L_1E_1 + L_2E_2 + \dots + L_mE_m) + A \quad (2)$$

con: $L_i = L_{n_i}$ ($i=1\dots m$) en el caso de depósitos no consolidados

$L_i = L_{c_i}$ ($i=1\dots m$) en el caso de rocas consolidadas

4.2.3. Cobertura del Suelo más cubierta Litológica (Puntaje P_t)

El puntaje de efectividad de protección (puntaje R) para el suelo entero y la cobertura de roca sobre el acuífero es la suma de P_1 y P_2

$$P_t = P_1 + P_2 \quad (3)$$

4.3. Determinación de la Vulnerabilidad

La Vulnerabilidad de un acuífero es inversamente proporcional a la Efectividad de Protección Generalizada, esta relación se presenta en la tabla 4.5 (propia del método BGR), en la cual además se presenta el tiempo de residencia aproximado en el suelo y subsuelo para cada categoría de vulnerabilidad.



Tabla N° 4.5 Clases de Efectividad Generalizada de Protección y Vulnerabilidad asociada

P_t, número total de puntos	Efectividad generalizada de protección	Vulnerabilidad asociada, estimada, del acuífero ante emisiones	Tiempo de residencia aproximado en el suelo y subsuelo sobre el acuífero
≥ 4000	Muy alta	Baja	> 25 años
2000 – 3999	Alta		10-25 años
1000 – 1999	Moderada	Media	3-10 años
500 – 999	Baja	Alta	Varios meses a 3 años
≤ 499	Muy baja		Unos pocos días a 1 año

5. Instrucciones Específicas para la Determinación de la Vulnerabilidad de Acuíferos

En la sección anterior se presentaron las instrucciones generales para la determinación de la vulnerabilidad de un acuífero, las cuales están basadas esencialmente en un determinado método (BGR), el cual es aplicable a cualquier caso. En la presente sección se establecen instrucciones particulares, las cuales están orientadas a establecer ciertos requerimientos mínimos de información y a diferenciar casos típicos con los que se puede encontrar un usuario cualquiera de este manual.

Se ha realizado una separación en casos tipo. Dicha separación obedece fundamentalmente a la cantidad de información que se posea de la zona en que interesa determinar la vulnerabilidad. Específicamente, la información que pueda ser recopilada sobre la descripción estratigráfica de pozos profundos o sondajes de investigación será determinante para definir en presencia de qué caso se esté.

Los datos con los que se deberá contar para la determinación de la vulnerabilidad son los siguientes:

- Capacidad de Campo Efectiva (CCE) del suelo (en el caso que la emisión se ubique sobre éste).
- La recarga natural medida (RN) o estimada (RNest) con las condiciones de evapotranspiración potencial y de precipitaciones, y la recarga artificial (RA) asociada al caudal y a la superficie de infiltración.
- Descripción estratigráfica de las unidades litológicas bajo el suelo, obtenida a través de calicatas, sondajes de investigación o pozos profundos.



- Nivel estático histórico del acuífero (si existe estadística) o mediciones del nivel de la napa en el período de mayores niveles (si no existe estadística).

Además, el informe en que se determine la vulnerabilidad de una determinada área deberá contener los siguientes antecedentes, a modo de referencia:

- Mapa de la geología de superficie del área de interés, a una escala adecuada.
- Mapa topográfico de la zona a escala adecuada, esto es (1:50.000, 1:25.000 o si existe 1:10.000). Sobre el mapa se deberán mostrar los pozos presentes en el área señalando su uso y los niveles del agua subterránea junto con las fechas de medición.

La Dirección General de Aguas (DGA) tendrá la facultad de velar por la buena calidad de la información, pudiendo exigir la certificación de los datos presentados por el titular, el cual deberá corregirlos en caso de no cumplir con lo requerido. Además la DGA solicitará al titular monitoreos periódicos del acuífero de acuerdo con los requerimientos y características del estudio.

5.1. Casos Tipo

A continuación se presentan los dos casos tipo que pueden ser distinguidos, de acuerdo con el grado de información que se posea del área de interés.

5.1.1. Caso 1

Existe información que permite determinar la vulnerabilidad del acuífero (utilizando el método BGR) en a lo menos 3 pozos en un radio de a lo más 2 km en torno al lugar donde se pretende realizar la infiltración. Estos pozos deberán estar distribuidos representativamente dentro de dicha área, lo que significa que los puntos de ubicación de estos, serán considerados como vértices de un polígono, dentro del cual debe estar ubicada la futura emisión.

Para determinar la vulnerabilidad en cada pozo se supondrá que la infiltración se realizará en las mismas condiciones que en el punto de infiltración (tipo de infiltración, volumen, profundidad, etc.)

Para este caso podemos distinguir dos situaciones:

- i) Los resultados que entrega la información en cada pozo son homogéneos, es decir, arrojan una misma estimación sobre la vulnerabilidad, por lo tanto, esta información podrá ser extrapolada al sitio de interés.



En este caso la vulnerabilidad del acuífero en la zona de infiltración se calculará utilizando el pozo o sondaje con la información más desfavorable.

- ii) Los resultados que entrega la información no son homogéneos, es decir, arrojan diferentes vulnerabilidades (por ejemplo alta y baja o media y alta, etc.). Para este caso se deberá generar información en el área de interés. Esto puede significar, desde evaluar información geofísica y de calicatas que entreguen datos sobre la estratigrafía y el nivel estático, hasta la perforación de un sondaje de investigación en el punto propuesto de emisión o en un radio de 100 m, cuya descripción estratigráfica debe ser evaluada por un especialista, como: ingeniero civil, hidrogeólogo, geólogo, técnico en suelos, o equivalente.

En caso que se opte por solicitar la perforación de un sondaje al proponente, éste podrá optar por perforar hasta alumbrar las aguas subterráneas o hasta una profundidad tal que la estratigrafía descrita en conjunto con las características de la emisión, sean suficientes para establecer la categoría de vulnerabilidad a la cual el proponente adecuará el tratamiento de sus efluentes. La Tabla N° 5.2 determina la profundidad mínima de investigación, de acuerdo con la estratigrafía, que asegura que el área se encuentra en un determinado rango de vulnerabilidad, considerando la máxima recarga ($R=0,5$).

Tabla N° 5.2

Espesores (m) mínimos bajo una eventual emisión, necesarios para lograr una vulnerabilidad media o baja, sin considerar el espesor de suelo, sino se llega a alumbrar el agua subterránea.

Depósito No Consolidado	Espesor (m) para Vulnerabilidad Media (puntaje > 1000)	Espesor (m) para Vulnerabilidad Baja (puntaje > 2000)
Grava	>400	>800
Arena con grava	>200	>400
Arena	>80	>160
Arena levemente limosa con grava	>40	>80
Grava limosa arenosa	>33,4	>66,8
Arena levemente arcillosa	>26,6	>53,2
Arena muy limosa	>22,2	>44,4
Limo muy arcilloso	>9	>18
Arcilla muy limosa, arcilla arenosa	>7,4	>14,8
Arcilla limosa	>6,2	>12,4
Arcilla levemente arenosa	>5,7	>11,4
Arcilla gredosa, arcilla levemente limosa	>5	>10
Arcilla	>4	> 8



Roca Consolidada	Vulnerabilidad Media (puntaje > 1000)	Vulnerabilidad Baja (puntaje > 2000)
Caliza, muy karstificada	>1332	>2664
Arenisca, porosa, muy fracturada	>666	>1332
Roca Volcánica fracturada	>555	>1111
Arenisca, muy fracturada	>444	>888
Arcillolita, muy fracturada	>332	>664
Arenisca, porosa, moderadamente fracturada	>200	>400
Arenisca, moderadamente fracturada	>132	>264
Arcillolita, moderadamente fracturada	>100	>200
Caliza, levemente fracturada	>100	>200
Arenisca, levemente fracturada	>33,2	>66,4
Arcillolita, levemente fracturada	>25	>50

5.1.2. Caso 2

No existe información en la zona de interés, en este caso se deberá generar la información de acuerdo con los mismos procedimientos de la situación ii) del Caso 1, punto 5.1.1.

6. Ejemplos

Con la finalidad de aclarar la aplicación del método antes descrito, a continuación se presentan una serie de ejemplos de cálculos de vulnerabilidad.

En los ejemplos 1 al 4 se asumen los siguientes datos:

- Suelo con 2 % de materia orgánica (humus) y con una densidad efectiva de sedimentación promedio Dd_3 , ver Anexo 2 (Manual de Mapeo de Suelos, AG BODENKUNDE 1982).
- $R_{Nest} = P - ETP_{pot} = 100 \text{ mm/año}$
- $RA = 175,2 \text{ mm/año}$ (Considerando una industria que infiltra un $Q = 1 \text{ m}^3/h$, en un área de 50.000 m^2)
- Acuífero superior no confinado

Para determinar R de la tabla 4.2 se tiene que, $R_{Nest} + RA = 100 + 175,2 = 275,2 \text{ mm/año}$



Ejemplo 1

Espesor total de la cobertura sobre el acuífero = 6 m.

- 0,0 a 0,8 m suelo arenoso con gravas (o arena gruesa)
- 0,8 a 2,0 m arena limosa con gravas
- 2,0 a 3,0 m grava arenosa
- 3,0 a 4,0 m arena con grava
- 4,0 a 6,0 m grava arenosa

De la Tabla 8.3 del Anexo 2 se obtiene $CCEU=5,5$ mm/dm y considerando un espesor del suelo de 8 dm, $\Sigma CCE= 5,5 \times 8 = 44$ mm, luego de la tabla N°4.1 se obtiene el valor de S.

$$S = 10 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.1)$$

$$R = 1,0 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.2)$$

$$P_1 = S \times R = 10 \times 1,0 = 10 \quad (\text{de la expresión 1})$$

$$L_{n1} \times E_1 = 50 \times 1,2 = 60 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.3)$$

$$L_{n2} \times E_2 = 10 \times 1,0 = 10 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.3)$$

$$L_{n3} \times E_3 = 25 \times 1,0 = 25 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.3)$$

$$L_{n4} \times E_4 = 10 \times 2,0 = 20 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.3)$$

$$P_2 = R \times (L_{n1} \times E_1 + L_{n2} \times E_2 + L_{n3} \times E_3 + L_{n4} \times E_4) = 1,0 \times 115 \quad (\text{de la expresión 2})$$

$$P_t = P_1 + P_2 = 125 \text{ puntos} \quad (\text{de la expresión 3})$$

Efectividad de protección muy baja \implies Vulnerabilidad Alta (de la tabla 4.5)

Ejemplo 2

Espesor total de la cobertura sobre el acuífero = 16 m.

- 0,0 a 1,1 m suelo franco limoso (limo con arena y arcilla)
- 1,1 a 5,0 m arcilla limosa
- 5,0 a 15,0 m arcilla levemente limosa
- 15,0 a 16,0 m arena levemente limosa con gravas

De la Tabla 8.2 del Anexo 2 se obtiene $CCEU=22,0$ mm/dm y considerando un espesor del suelo de 10 dm, $\Sigma CCE= 22,0 \times 10 = 220$ mm, luego de la tabla N°4.1 se obtiene el valor de S.



$$\begin{aligned} S &= 500 && \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.1)} \\ R &= 1,0 && \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.2)} \end{aligned}$$

$$P_1 = 500 \times 1,0 = 500,0 \quad \text{(de la expresión 1)}$$

$$L_{n1} \times E_1 = 300 \times 0,1 = 30 \quad \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.3)}$$

$$L_{n2} \times E_2 = 320 \times 3,9 = 1248 \quad \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.3)}$$

$$L_{n3} \times E_3 = 400 \times 10,0 = 4000 \quad \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.3)}$$

$$L_{n4} \times E_4 = 50 \times 1,0 = 50 \quad \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.3)}$$

$$P_2 = R \times (L_{n1} \times E_1 + L_{n2} \times E_2 + L_{n3} \times E_3 + L_{n4} \times E_4) = 1,0 \times 5328 = 5328 \quad \text{(de la expresión 2)}$$

$$P_t = P_1 + P_2 = 5828 \text{ puntos} \quad \text{(de la expresión 3)}$$

Efectividad de protección muy alta \implies Vulnerabilidad Baja (de la tabla 4.5)

Ejemplo 3

Espesor total de la cobertura sobre el acuífero = 50 m.

- 0,0 a 1,2 m suelo gredoso limoso
- 1,2 a 2,2 m arena limosa gredosa
- 2,2 a 50,0 m caliza fuertemente karstificada

De la Tabla 8.2 del Anexo 2 se obtiene $CCEU=23,5 \text{ mm/dm}$ y considerando un espesor del suelo de 10 dm, $\Sigma CCE= 23,5 \times 10 = 235 \text{ mm}$, luego de la tabla N^o4.1 se obtiene el valor de S.

$$\begin{aligned} S &= 500 && \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.1)} \\ R &= 1,0 && \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.2)} \end{aligned}$$

$$P_1 = 500 \times 1,0 = 500 \quad \text{(de la expresión 1)}$$

$$L_{n1} \times E_1 = 400 \times 0,2 = 80 \quad \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.3)}$$

$$L_{n2} \times E_2 = 140 \times 1,0 = 140 \quad \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.3)}$$

$$L_c \times E_3 = (5 \times 0,3) \times 47,8 = 71,7 \quad \text{(tabla N}^\circ \text{ 4.4)}$$

$$P_2 = R \times (L_{n1} \times E_1 + L_{n2} \times E_2 + L_c \times E_3) = 1,0 \times 291,7 = 291,7 \quad \text{(de la expresión 2)}$$

$$P_t = P_1 + P_2 = 791,7 \text{ puntos} \quad \text{(de la expresión 3)}$$

Efectividad de protección baja \implies Vulnerabilidad Alta (tabla N^o 4.5)



Ejemplo 4

Espesor total de la cobertura sobre el acuífero = 25 m.

- 0,0 a 1,2 m suelo con 68 % arcilla y 32 % limo
- 1,2 a 3,8 m 90 % arcilla y 10% limo
- 3,8 a 25,0 m arenisca levemente fracturada

De la Fig. 8.2 y Tabla 8.2 del Anexo 2 se obtiene $CCEU=16 \text{ mm/dm}$ y considerando un espesor del suelo de 10 dm, $\Sigma CCE=16 \times 10 = 160 \text{ mm}$, luego de la tabla N°4.1 se obtiene el valor de S.

$$S = 250 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.1)$$

$$R = 1,0 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.2)$$

$$P_1 = 250 \times 1,0 = 250 \quad (\text{de la expresión 1})$$

$$L_{n1} \times E_1 = 320 \times 0,2 = 64 \quad (\text{Figura N}^\circ 4.1)$$

$$L_{n2} \times E_2 = 400 \times 2,6 = 1040 \quad (\text{Figura N}^\circ 4.1)$$

$$L_c \times E_3 = (15 \times 4,0) \times 21,2 = 1272 \quad (\text{tabla N}^\circ 4.4)$$

$$P_2 = R \times (L_{n1} \times E_1 + L_{n2} \times E_2 + L_c \times E_3) = 1,0 \times 2376 = 2376 \quad (\text{de la expresión 2})$$

$$P_t = P_1 + P_2 = 2626 \text{ puntos} \quad (\text{de la expresión 3})$$

Efectividad de protección alta \implies Vulnerabilidad Baja (tabla N° 4.5)



7. Referencias

AG BODENKUNDE (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 4 Auflage; Hannover.

BGR-LÄNDER (1993): Concept for the Determination of the Protective Effectiveness of the Cover Above the Groundwater Against Pollution.

CUSTODIO E. (1976): Hidrogeoquímica. In *Hidrología Subterránea*. Sec. 10: p 1038

D.S. N° 46/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia: Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas

HÖLTING, B.; HAERTLÉ, T.; HOHBERGER, K-H.; NACHTIGAL, K.; VILLINGER, E.; WEINZIERL, W.; WROBEL, J-P. (1995): Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung. *Geologisches Jahrbuch*, C 63, p. 5-24. Hannover, Alemania.

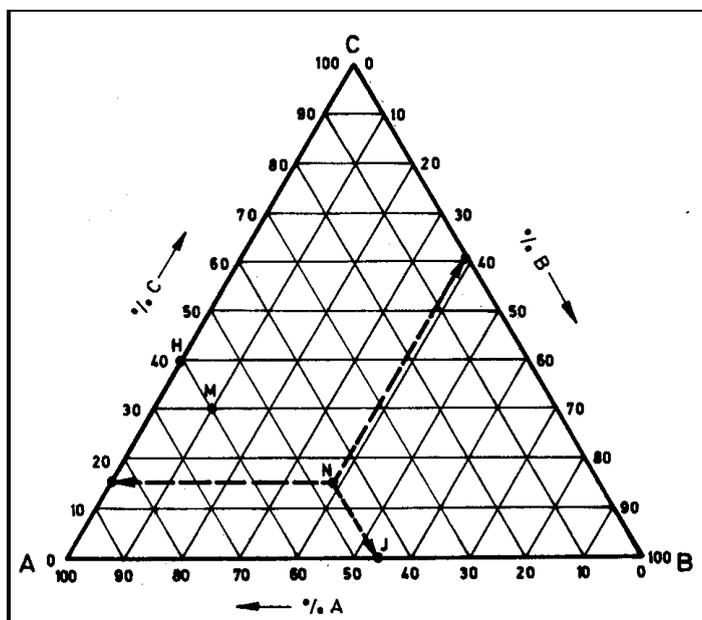
8. Anexos

8.1. Anexo 1 - Utilización de Diagramas Triangulares

Los diagramas triangulares son ideales para presentar tres componentes. Cada uno de los vértices de un triángulo equilátero (figura N° 8.1) representa uno de los componentes (A, B o C) puros o unitarios, tal como simboliza el 100% puesto en cada uno de ellos. Un punto tal como el J representa una muestra binaria de 45% de A y por lo tanto $100-45=55\%$ de B. Un punto situado en el interior del triángulo, tal como el M, representa una mezcla ternaria; como el vértice más cercano es el A y el más lejano el B, esa mezcla tiene: contenido en A > contenido en C > contenido en B.

Si se quiere saber cuantitativamente la composición de la muestra en uno de los componentes basta trazar por el punto representativo una paralela al lado opuesto al vértice que representa a ese componente y leer en el lado que representa fracciones del mismo el % que corresponde; así, si se desea saber el contenido de M en el componente B basta trazar por M una paralela a AC hasta cortar BC y obtendremos 10% de B; similarmente se obtiene 30% de C y 60% de A. El punto N representa una mezcla formada por 46% de A, 39% de B y 15% de C.

Figura 8.1
Diagrama Triangular para Mezclas Ternarias
(Tomado de Custodio; Llamas, 1976)





8.2. Anexo 2 - Determinación de la Capacidad de Campo Efectiva (CCE)

A continuación se presentan 2 posibilidades para la determinación de la CCE:

- a) Una forma de determinar la CCE es mediante pruebas de laboratorios, los cuales deberán estar debidamente acreditados.
- b) Otra forma de determinar la CCE con datos de terreno es a través de las tablas y figuras del Manual de Mapeo de Suelos AG BODENKUNDE 1982, que permiten la estimación de la CCE por la composición del suelo. Para facilitar la comprensión del procedimiento se modificó la nomenclatura original del texto alemán.

Para determinar la CCE de cada horizonte de suelo o de toda la cobertura de suelo orgánico (1 m de espesor) según el tipo de suelo, se utilizan las Tablas 8.2 y 8.3. En la primera columna de la Tabla 8.2 aparece un número, el cual se obtiene del triángulo de texturas de la Figura 8.2. Para encontrar este número, se debe tener la granulometría del suelo. Para esto, mediante ensayos de laboratorio, se determina primero, el porcentaje de gruesos o esqueleto (grava, gravilla, etc.) y de humus en la muestra. Luego con el material restante (suelo fino) se determinan los % de arcilla, limo y arena, con los cuales se entra en el triángulo de la Figura 8.2 y se determina el número asociado al tipo de suelo. A continuación la Capacidad de Campo Efectiva Unitaria (CCEU) se determina con la Tabla 8.2 dependiendo del valor de la Densidad Efectiva de Depositación o Sedimentación (Dd). Esta última se mide con un cilindro de muestreo cuyo volumen interno es conocido. Se toma la muestra llenando el cilindro completamente y se vacía en un recipiente de cerámica. Luego se seca a 105°C durante 24 horas y se pesa. La Dd es igual al (peso de la muestra secada)/(volumen interno del cilindro) [g/cm³]. Este valor tiene un rango entre 0,4 y 2 g/cm³, los que se clasifican como sigue en la Tabla 8.1.

Tabla N° 8.1 Clasificación de la Densidad Efectiva de Depositación Dd

Dd [g/cm ³]	Clasificación
<0,7	Dd ₁
0,7 - 1,0	Dd ₂
1,0 - 1,3	Dd ₃
1,3 - 1,6	Dd ₄
>1,6	Dd ₅

Si el suelo es muy arenoso y prácticamente sin presencia de limos y arcillas, se debe utilizar la Figura 8.3 con los % de arenas gruesas, medias y finas. Luego con el número obtenido en la Figura 8.3 se entra en la Tabla 8.3 y se determina la CCEU.



La CCEU obtenida por cualquiera de las 2 Tablas 8.2 u 8.3, debe multiplicarse por la por la razón entre el peso de suelo fino en la muestra y el peso total de la muestra. Finalmente este es el valor de CCEU que se utiliza en la metodología y que se multiplica por el espesor de cada horizonte o de la cobertura total de suelo, para determinar la CCE total. Con este último valor se entra en la Tabla 4.1 y se obtiene el puntaje S.

Tabla N° 8.2 Capacidad de Campo Efectiva Unitaria [mm/dm de espesor del estrato de suelo] o [%] según el tipo de suelo y la densidad efectiva de deposición (Dd) para suelos minerales con poco humus.

No.	Descripción litológica del suelo	Traducción	Litología (código edafológico alemán)	CCEU (mm/dm)		
				Dd ₁₋₂	Dd ₃	Dd ₄₋₅
1	A	Arena	S	12,0	10,5	9,0
2	A, l'	Arena poco limosa	Su2	17,5	16,0	13,0
	A, l	Arena limosa				
3	A, l	Arena limosa	Su3	23,0	20,5	18,0
	A, l!	Arena muy limosa				
4	A+L	Arena y limo	Su4	26,5	22,0	20,0
5	L+A	Limo y arena	Limo Us	27,0	25,5	21,5
	L, a!	con mucha arena				
	L, a	con arena				
6	L, a'	Limo con poca arena	U	28,5	26,0	23,0
	L	Limo				
7	A, ac'	Arena con poca arcilla	St2	18,5	14,0	13,5
8	A, l, ac'	Grava 1%, arena 71%, limo -arcilla 28%	Sl2	19,0	17,5	16,0
9	A, l, ac'	Grava 1%, arena 71%, limo -arcilla 28%	Sl3	21,5	18,0	15,5
	A, l!, ac'	Grava 1%, arena 64%, limo -arcilla 35%				
10	A, l, ac	Arena 59%, limo-arcilla 41%	Arena Arena y S14	20,5	17,0	14,5
	A, l!, ac	55%, limo -arcilla 45%				
	A+L, ac	limo con arcilla				
11	L+A, ac'	Limo y arena con poca arcilla	Slu	27,5	21,0	17,0
	L+A, ac	Limo y arena con arcilla				
12	L, a!, ac'	Limo con mucha arena y poca arcilla	Uls	26,0	22,0	19,5
	L, a!, ac	Limo con mucha arena y arcilla				
	L, a, ac'	Limo con arena y poca arcilla				
	L, a, ac	Limo con arena y arcilla				
13	L, a, ac'	Limo con arena y poca arcilla	Ut2	27,0	25,0	21,0
	L, a', ac'	Limo con poca arena y poca arcilla				
	L, ac'	Limo con poca arcilla				
14	L, ac, a'	Limo con arcilla y poca arena	Ut3	25,5	23,5	21,5
	L, ac	Limo con arcilla (Greda)				
15	A, ac	Arena con arcilla (arena arcillosa)	St3	19,5	15,5	12,0
16	A, ac, l'	Arena arcillosa poco limosa	Ls4	21,0	16,0	12,5
17	A, ac, l	Arena arcillosa limosa	Ls3	20,0	15,0	13,0
18	A+L, ac	Arena y limo con arcilla	Lsu	25,0	22,0	18,0



19	L, a!, ac	Limo con mucha arena y arcilla	Lu	21,0	17,0	14,5	
	L, ac, a	Limo con arcilla y arena					
	L, ac, a'	Limo con arcilla y poca arena					
	L, ac!, a!	Limo con mucha arcilla y mucha arena					
	L, ac!, a	Limo con mucha arcilla y arena					
	L, ac!, a'	Limo con mucha arcilla y poca arena					
L, ac!	Limo con mucha arcilla						
20	L, ac!	Limo con mucha arcilla	Ut4	22,0	20,5	18,0	
21	A, ac!	Arena muy arcillosa	Ts4	17,5	15,5	12,0	
22	A, ac!, l'	Arena muy arcillosa poco limosa	Arcilla	Lts	17,5	13,5	10,5
	A, ac!, l	Arena muy arcillosa limosa					
	A, ac!, l!	Arena muy arcillosa muy limosa					
	A+Ac, l	Arena y arcilla con limo					
	Ac+A, l	y arena con limo					
23	L, ac!, a	Limo con mucha arcilla y arena	Lt2	17,5	15,5	11,0	
	L+A, ac!	Limo y arena con mucha arcilla					
24	L+Ac, a!	Limo y arcilla con mucha arena	Limo y Lt3	17,5	14,0	10,0	
	L+Ac, a	Limo y arcilla con arena					
	L+Ac, a'	arcilla con poca arena					
25	L+Ac	Limo y arcilla	Ltu	20,0	19,0	18,0	
	L+Ac, a'	Limo y arcilla con poca arena					
26	A+Ac	Arena y arcilla	Ts3	18,5	15,5	11,5	
27	Ac+A	Arcilla y arena	Ts2	18,5	15,0	11,5	
28	Ac, l!, a!	Arcilla con mucho limo y mucha arena	Tl	18,5	14,5	11,0	
	Ac, l, a!	Arcilla con limo y mucha arena					
	Ac, l, a'	Arcilla con limo y poca arena					
29	Ac, l!	Arcilla con mucho limo	Tu	19,5	16,0	12,0	
30	Ac	Arcilla plástica (arcilla pura)	T	18,0	16,0	11,0	
	Ac, a'	(plástica) con poca arena					
	Ac, l'	Arcilla con poca limo					
	Ac, a', l'	Arcilla con poca arena y poca limo					
	Ac, a, l'	Arcilla con arena y poca limo					
	Ac, l, a'	Arcilla limosa con poca arena					



Figura 8.2 Triángulo de tipos de suelos finos según DIN 4220

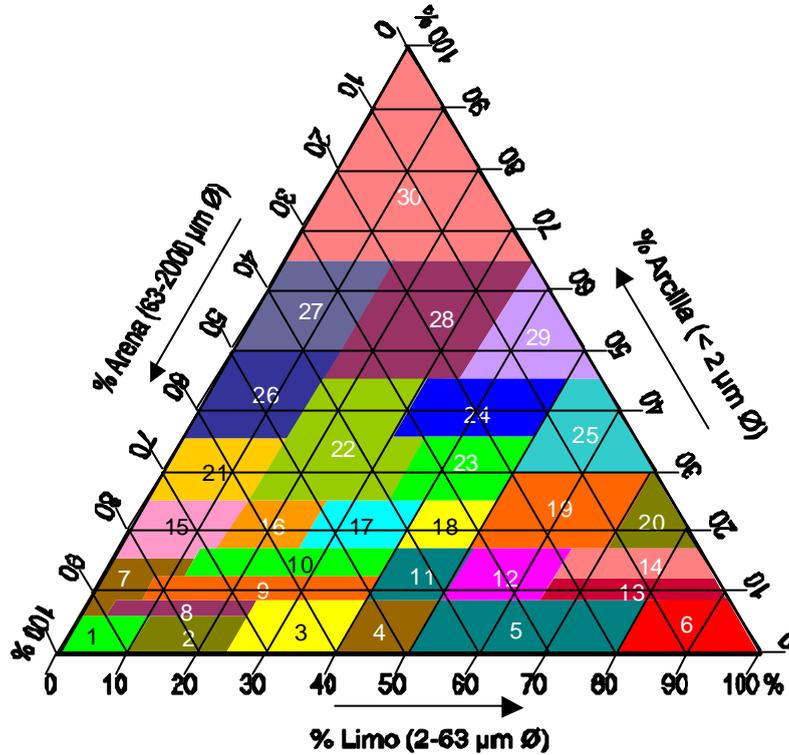


Figura 8.3 Triángulo de clasificación de arenas

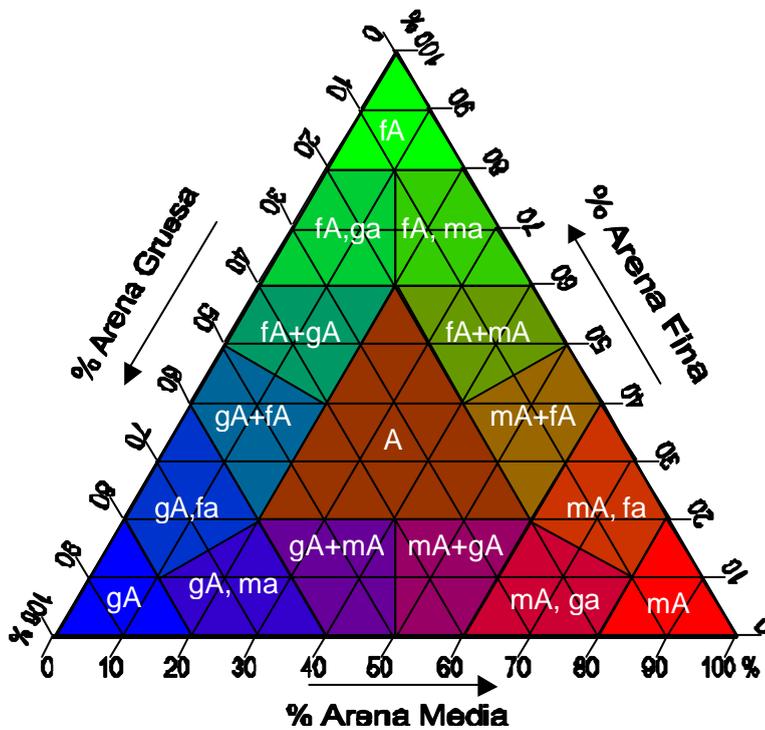




Tabla N° 8.3 Capacidad de Campo Efectiva Unitaria [mm/dm de espesor del estrato de suelo] o [%] según el tipo de arena y la densidad efectiva de depositación (Dd) para suelos minerales con poco humus

Descripción litológica del suelo	Traducción	CCEU (mm/dm)		
		Dd ₁₋₂	Dd ₃	Dd ₄₋₅
gA	Arena gruesa	7,5	5,5	4,0
gA, ma	Arena gruesa con poca arena media	9,0	6,5	4,5
gA+mA	Arena gruesa con arena media	10,0	7,0	5,0
mA+gA	Arena media con arena gruesa	10,5	7,5	5,0
mA, ga	Arena media con poca arena gruesa	11,0	8,0	5,5
gA, fa	Arena gruesa con poca arena fina	17,0	15,5	14,0
gA+fA	Arena gruesa con arena fina	18,0	16,5	15,0
fA+gA	Arena fina con arena gruesa	18,5	17,0	15,5
fA, ga	Arena fina con poca arena gruesa	19,0	17,5	16,0
fA	Arena fina	21,5	20,0	18,5
fA, ma	Arena fina con poca arena media	17,5	16,5	15,0
fA+mA	Arena fina con arena media	16,5	15,0	13,5
mA+fA	Arena media con arena fina	15,5	14,0	12,0
mA, fa	Arena media con poca arena fina	14,5	12,5	10,5
mA	Arena media	9,0	7,5	6,0
A	Arena	12,0	10,5	9,0

8.3. Anexo 3 - Test de Confiabilidad

Para probar que los métodos de cálculo sugeridos llevan a resultados coherentes, en los párrafos siguientes se hacen comparaciones de la efectividad de protección de tipos de estratos litológicamente diferentes.

8.3.1. La efectividad de protección de 1.0 m de arcilla corresponde a:

- 1,6 m arcilla limosa
- 1,9 m arcilla muy limosa; arcilla arenosa
- 2,3 m limos muy arcilloso; greda limosa
- 2,5 m arcilla muy arenosa
- 3,2 m limo levemente arcilloso; limo; greda muy arenosa
- 3,6 m arena arcillosa; arena gredosa limosa
- 5,6 m arena muy limosa
- 7 m arena levemente arcillosa; grava arenosa arcillosa
- 8 m grava arenosa limosa
- 10 m arena levemente limosa
- 20 m arena
- 50 m arena con grava; grava arenosa
- 100 m grava, grava con bloques



8.3.2. Comparación de la efectividad de protección de diferentes tipos de estratos

8.3.2.1 Se supone que cada estrato tiene 10 m de espesor y la cubierta de suelo se desprecia.

Depósito no consolidado	Puntos (P _i)	Efectividad de Protección	
Grava	50	Muy baja	
Arena con grava	100		
Arena	250		
Arena levemente limosa con grava	500		
Grava limosa arenosa	600	Baja	
Arena levemente arcillosa	750		
Arena muy limosa	900		
Limo muy arcilloso	2200	Alta	
Arcilla muy limosa, arcilla arenosa	2700		
Arcilla limosa	3200		
Arcilla levemente arenosa	3500		
Arcilla gredosa, arcilla levemente limosa	4000	Muy alta	
Arcilla	5000		
Roca sólida	Puntos	Efectividad de Protección	
Caliza, muy karstificada	15	Muy baja	
Arenisca, porosa, muy fracturada	30		
Arenisca, muy fracturada	45		
Arcillolita, muy fracturada	60		
Arenisca, porosa, moderadamente fracturada	100		
Arenisca, moderadamente fracturada	150		
Arcillolita, moderadamente fracturada	200		
Caliza, levemente fracturada	200		
Arenisca, levemente fracturada	600		Baja
Arcillolita, levemente fracturada	800		

8.3.2.2 Se supone que cada estrato tiene 25 m de espesor y la cubierta de suelo se desprecia.

Depósito no consolidado	Puntos (P _i)	Efectividad de Protección
Grava	125	Muy baja
Arena con grava	250	
Arena	625	Baja
Arena levemente limosa con grava	1250	Moderado
Grava limosa arenosa	1500	
Arena levemente arcillosa	1875	
Arena muy limosa	2250	Alto
Limo	4000	
Arcilla muy limosa, arcilla arenosa	5000	Muy alta
Limo muy arcilloso	5500	
Arcilla	>10000	



Roca sólida	Puntos	Efectividad de Protección
Caliza, muy karstificada	38	Muy baja
Arenisca, porosa, muy fracturada	75	Baja
Arenisca, muy fracturada	113	
Arcillolita, muy fracturada	150	
Arenisca, moderadamente fracturada	375	
Arcillolita, moderadamente fracturada	500	
Caliza, levemente fracturada	500	
Arenisca, porosa, levemente fracturada	1000	
Arenisca, levemente fracturada	1500	Moderada
Arcillolita, levemente fracturada	2000	