



**REPÚBLICA DEL PERÚ
MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS**

**GUÍA PARA EL DISEÑO
DE COBERTURAS DE DEPÓSITOS
DE RESIDUOS MINEROS**

SUB - SECTOR MINERÍA

Volumen XXIII

**Dirección General de
Asuntos Ambientales Mineros**

REPÚBLICA DEL PERÚ
MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

**GUÍA PARA EL DISEÑO DE COBERTURAS
DE DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS**

SUB - SECTOR MINERÍA

**DIRECCIÓN GENERAL DE
ASUNTOS AMBIENTALES MINEROS**

LIMA - PERÚ

Preparado por

Ward Wilson, Ph.D., P.Eng.

Bruno Brussi re, Ph.D., P.Eng.

Ing. Juan Guerreo

por encargo del



PROYECTO DE REFORMA DEL
SECTOR DE RECURSOS
MINERALES DEL PERU



**Canadian International
Development Agency**

**Agence canadienne de
développement international**

Todos los derechos reservados. Esta guía no puede ser total o parcialmente reproducida, memorizada en sistemas de archivo o transmitida en cualquier forma o medio electrónico, mecánico, fotocopia o cualquier otro sin la autorización previa del Ministerio de Energía y Minas del Perú.

Primera Edición: Setiembre de 2007

Índice

ÍNDICE

Sección	Página
ÍNDICE	III
ACRÓNIMOS	XI
PRESENTACIÓN	XIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Drenaje Ácido de Rocas	1
1.2 Métodos de Control de ARD	2
1.3 Objetivos y Contenido de la Guía	3
1.4 Limitaciones de la Guía	5
2 PRINCIPIOS TEÓRICOS	7
2.1 Flujo de agua a través de los materiales de cobertura	7
2.2 Flujo de Oxígeno a través de Materiales de Cobertura	9
2.2.1 Flujo Difusivo.....	9
2.2.2 Flujo Advectivo.....	11
2.3 Propiedades de Suelo No Saturado	11
2.3.1 Curva de Retención de Agua (WRC).....	11
2.3.2 Función de Permeabilidad	12
2.4 Efectos de Barrera Capilar	15
2.5 Interacciones Suelo-Atmósfera	17
3 COBERTURAS DE ALMACENAMIENTO Y DESCARGA Y COBERTURAS DE ALMACENAMIENTO, DESVIACIÓN Y DESCARGA	21
3.1 Cobertura SR	22
3.1.1 Impacto de las Propiedades del Suelo No Saturado	23
3.1.2 Impacto del Espesor de la Capa	26
3.1.3 Impacto de las Condiciones Climáticas	26
3.2 Cobertura SDR	28
3.2.1 Efecto de la pendiente	28
3.2.2 Modelamiento Numérico	31
3.2.3 Efecto de la tasa de precipitación	33
3.2.4 Efecto de la conductividad hidráulica saturada	34
3.2.5 Efecto del espesor de la cobertura	34
3.3 Metodología para el diseño	36
3.3.1 Caracterización de los materiales de la cobertura – Paso 1	36
3.3.2 Recolección de información climática y acerca de la vegetación – Paso 2	36
3.3.3 Evaluación preliminar del espesor de la cobertura – Paso 3	37
3.3.4 Modelamiento numérico del flujo no saturado – Paso 4.....	38
3.3.5 Modelamiento físico –Paso 5.....	38
3.3.6 Diseño final, construcción y monitoreo a largo plazo - Pasos 6 y 7	39
3.4 Comentarios finales	40
4 COBERTURA CON EFECTOS DE BARRERA CAPILAR	43

Índice

4.1	Generalidades	43
4.2	Configuración Típica	43
4.3	Principales Factores de Influencia – Análisis Numérico Unidimensional	44
4.3.1	Descripción del Modelo Numérico	45
4.3.2	Impacto de las Propiedades del Suelo No Saturado y Configuración de la Cobertura	47
4.3.3	Impacto de la capa de grano grueso de la base.....	53
4.3.4	Impacto de la Superficie Freática	53
4.4	Impacto de la Pendiente – Análisis Numérico Bidimensional	54
4.4.1	Descripción del Modelo Numérico	55
4.4.2	Efecto de las propiedades del material en la distribución del agua en la capa de retención de humedad	60
4.4.3	Impacto sobre la Capacidad para Limitar la Migración del Oxígeno	61
4.5	Otros factores de Influencia	63
4.6	Metodología para el Diseño	66
4.6.1	Caracterización de los Materiales de la Cobertura – Paso 1	68
4.6.2	Recolección de Información Climática – Paso 2	69
4.6.3	Evaluación Preliminar– Paso 3	70
4.6.4	Modelamiento Numérico –Paso 4.....	70
4.6.5	Modelamiento Físico de Laboratorio – Paso 5	71
4.6.6	Diseños de Prueba In Situ – Paso 6.....	71
4.6.7	Diseño final, Construcción y Monitoreo a Largo Plazo – Pasos 7 y 8.....	72
4.7	Comentarios Finales	72
5	INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO	75
5.1	Parámetros Fundamentales	75
5.2	Medición de la Succión	75
5.2.1	Tensiómetros	75
5.2.2	Bloque de Resistencia Eléctrica	76
5.2.3	Bloques de Yeso.....	76
5.2.4	Sensor de Matriz Granular o Bloques Watermark	77
5.2.5	Sensor de Disipación de Calor	78
5.2.6	Sicrómetro de Suelo	78
5.2.7	Potenciómetro WP4.....	79
5.2.8	Equitensiómetro EQ2.....	80
5.2.9	Interruptores Electro-ópticos.....	81
5.2.10	Técnica del Papel de Filtro	81
5.2.11	Resumen de los Métodos de Medición de la Succión.....	82
5.3	Medición del Contenido Volumétrico de Agua	83
5.3.1	Métodos Gravimétricos	83
5.3.2	Métodos Radioactivos.....	84
5.3.3	Métodos Dieléctricos.....	87
5.3.4	Métodos Geofísicos de Campo a Gran Escala.....	94
5.3.5	Resumen de los Métodos de Medición del Contenido Volumétrico de Agua.....	97
5.4	Parámetros Meteorológicos	99
5.4.1	Precipitación.....	100
5.4.2	Temperatura.....	100
5.4.3	Humedad Relativa	100
5.4.4	Velocidad del Viento	100
5.4.5	Evaporación	100

Índice

5.5	Tasa de Filtración y Calidad de Agua	103
5.5.1	Lisímetros de Succión.....	103
5.5.2	Lisímetros de Filtración.....	104
5.6	Pruebas Modificadas de Consumo de Oxígeno y Perfiles de Concentración de Oxígeno	105
5.6.1	Pruebas Modificadas de Consumo de Oxígeno	105
5.6.2	Método de la Gradiente de Oxígeno.....	106
5.7	Comentarios Finales	107
6	LA REVEGETACIÓN DE COBERTURAS DE DEPÓSITOS DE RELAVES Y ROCAS DE DESMONTE	109
6.1	Objetivos	109
6.2	Principales Ventajas, Funciones y Dificultades que tienen la Vegetación en los Programas de Revegetación de Coberturas	109
6.2.1	Ventajas del Uso de la Vegetación.....	109
6.2.2	Funciones de la Vegetación.....	109
6.2.3	Limitaciones que se tiene el uso de plantas en programa de revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte	110
6.3	El proceso de Revegetación de Coberturas de Relaves y Rocas de Desmonte	112
6.3.1	Determinación del Uso de la Tierra	112
6.3.2	Extendido del suelo superficial antes de la revegetación.....	113
6.3.3	Mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a ser utilizado en la revegetación	113
6.4	Selección de Especies de Plantas	115
6.4.1	Requerimientos de Suelo.....	117
6.4.2	Requerimientos Climáticos	117
6.4.3	Principales Métodos de Propagación	120
6.5	Sistemas de Plantación	120
6.5.1	Dosis de Siembra y Semilla de Pastos.....	121
6.5.2	Siembra Indirecta - TRANSPLANTE	121
6.6	Manejo y monitoreo de las tierras revegetadas	121
6.7	Estudio de Casos sobre Experiencias de Revegetación de Coberturas de Relaves y Desmontes de Roca	123
6.7.1	Caso A: Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. - Unidad Minera Recuperada - Huancavelica.....	123
6.7.2	Caso B: Cia. Minera Milpo (Aguirre, A. y Otros. 1995).....	124
6.7.3	Caso C: Compañía Minera Centromin Perú en Quiulacocha.....	126
6.7.4	Caso D: Experiencias de Revegetación en Minera Yanacocha.....	128
7	RESUMEN DE CASOS DOCUMENTADOS	131
7.1	Equity Silver	131
7.2	Rum Jungle	136
7.3	Mina Barrick Goldstrike	143
7.4	Les Terrains Aurifères (LTA)	148
7.5	Mina de Oro Kidston	153
7.6	Mina Kristineberg	156
7.7	Mina Lorraine	163

7.8	Conclusión.....	168
8	REFERENCIAS.....	171

Lista de Tablas

Tabla 2-1	Ecuaciones de Modelos Usados para Describir la Curva de Retención de Agua de Materiales Granulares.....	14
Tabla 2-2	Algunos modelos usados para Describir la Conductividad Hidráulica.....	16
Tabla 3-1	Expresiones Matemáticas de las Soluciones Analíticas para una Barrera Capilar Homogénea Inclinada.....	31
Tabla 3-2	Principales Propiedades Hidráulicas de los Materiales.....	32
Tabla 4-1	Principales Características de las Capas de la CCBE.....	44
Tabla 4-2	Principales Características de los 6 Casos Modelados.....	47
Tabla 4-3	Principales Propiedades Hidráulicas de los Materiales Utilizados.....	58
Tabla 4-4	Principales Características de las Simulaciones Numéricas Desarrolladas en las Presas de Relaves Cubiertos.....	58
Tabla 4-5	Principales Propiedades de la Arcilla Sometida a Ciclos de Congelamiento/Descongelamiento (Dagenais 2005).....	64
Tabla 6-1	Altura del Topsoil para ser Almacenado y Evitar su Compactación.....	112
Tabla 6-2	Algunas Consideraciones para la Selección de Especies de Plantas.....	116
Tabla 6-5	Limitaciones para Siembra de Pastos con Diferentes Sistemas de Plantación en Hileras, al Voleo e Hidrosiembra.....	120
Tabla 6-6	Tratamientos de las Especies Vegetales.....	125
Tabla 7-1	Propiedades principales de los materiales de morrena usados en la cobertura de Equity Silver (modificadas de Weeks y Wilson 2005).....	133
Tabla 7-2	Propiedades del material para cada capa del sistema de cobertura.....	139
Tabla 7-3	Datos de carga históricos de contaminantes seleccionados.....	141
Tabla 7-4	Propiedades principales de los materiales usados en la cobertura de LTA (de Bussiére et al. 2006).....	151
Tabla 7-5	Resultados de las mediciones de oxígeno en la mina Kristineberg.....	161
Tabla 7-6	La cantidad de oxígeno disuelto que ingresa a los relaves en la mina (Carlson 2002).....	161
Tabla 7-7	Propiedades de los materiales usados en la CEBC de las pruebas de laboratorio previas a la construcción.....	165
Tabla 7-8	Resumen de la rehabilitación de diferentes minas.....	169

Lista de Figuras

Figura 2-1	Flujo del Agua a través de un Elemento de Suelo (inspirada en Hillel 1980).....	9
Figura 2-2	Comparación entre Valores de Coeficiente de Difusión.....	11
Figura 2-3	Curvas de Retención de Agua de Muestras de Relaves Mineros y Desmonte.....	13

Índice

Figura 2-4	Curvas de Conductividad Hidráulica Insaturada de Relaves Mineros y Desmonte.....	13
Figura 2-5	Perfiles de Contenido Volumétrico de Agua y Succión	17
Figura 3-1	Curvas de Retención de Agua de los Materiales Típicos Utilizados en una Cobertura SDR (MEND 2001)	22
Figura 3-2	Curvas de Retención de Agua de los Materiales Típicos Utilizados en una Cobertura SDR (de Khire et al. 2000)	23
Figura 3-3	Propiedades Hidráulicas No Saturadas de los Materiales Utilizados en el Estudio Numérico Paramétrico (Khire et al. 2000)	24
Figura 3-4	Impactos de las Propiedades No Saturadas del Material de Grano Fino en la Infiltración del Agua	25
Figura 3-5	Impactos de las Propiedades No Saturadas del Material de Grano Grueso en la Infiltración del Agua	25
Figura 3-6	Impactos del Espesor de la Capa de Retención de Humedad.....	26
Figura 3-7	Impactos del Espesor de la Capa de la Base (de Grano Grueso) en la Infiltración del Agua a través de las Coberturas (Khire et al. 2000).....	27
Figura 3-8	Impactos de las Condiciones Climáticas en la Infiltración del Agua a través de las Coberturas.....	28
Figura 3-9	Esquema de una Cobertura de Capas	29
Figura 3-10	Ejemplo de la Influencia del Ángulo de la Pendiente en la Longitud Efectiva de la Barrera Capilar.....	30
Figura 3-11	Malla Típica Utilizada en los Cálculos de Flujo No Saturado.....	33
Figura 3-12	Evolución de la Posición z_{85} (m) del Punto DDL (z_{85}) en la Precipitación	34
Figura 3-13	Ubicación del Punto DDL (z_{85}) después de las Precipitaciones.....	35
Figura 3-14	Evolución de la Ubicación del Punto DDL (z_{85}) durante la Precipitación	35
Figura 3-15	Diagrama para el Diseño de la Cobertura de Almacenamiento, Derivación y Descarga.....	40
Figura 4-1	Configuración Típica de una CCBE para Limitar la Producción de ARD (Aubertin et al. 1995)	45
Figura 4-2	Propiedades Hidráulicas de los Materiales para el Modelamiento Numérico Unidimensional	46
Figura 4-3	Evolución del Grado de Saturación y Succión en Cobertura de Dos Capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek	48
Figura 4-4	Evolución del Grado de Saturación y Succión en Cobertura de Dos Capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek Modificada.....	50
Figura 4-5	Evolución del Grado de Saturación (arriba) y Succión en la Cobertura de Tres Capas de Relaves Finos	51
Figura 4-6	Evolución del Grado de Saturación y Succión en la Cobertura de Tres Capas de Relaves Finos colocada entre Dos Capas de Arena Crab Creek.....	52
Figura 4-7	Evolución del Grado de Saturación en la Cobertura de Dos capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek	53
Figura 4-8	Evolución del Grado de Saturación en la Cobertura de Dos capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek	54
Figura 4-9	Malla Típica Utilizada en los Cálculos de Flujo No Saturado.....	56

Índice

Figura 4-10	Curvas de Retención de Agua y Funciones de Permeabilidad de los Suelos Utilizados	57
Figura 4-11	Distribución del Contenido Volumétrico de Agua	58
Figura 4-12	Evolución del Grado de Saturación	59
Figura 4-13	Distribución del Contenido Volumétrico de Agua	60
Figura 4-14	Evolución del Grado de Saturación en el Centro de la Capa de Retención de Humedad	61
Figura 4-15	Relaciones entre el Desempeño Normalizado y el Contraste de Retención de Agua.....	62
Figura 4-16	Evolución de k_{sat} y e con Ciclos de Congelación-Descongelación.....	64
Figura 4-17	Ejemplo de Penetración de Raíces a través de la Capa Superior de una CCBE (Trépanier 2005).....	65
Figura 4-18	Acercamiento del Drenaje Inferior de los Diques Estudiados	67
Figura 4-19	Diagrama para el Diseño de una CCBE.....	68
Figura 5-1	Tensiómetro Esquemático Instalado para Medir la Succión del Suelo	75
Figura 5-2	Bloque de Yeso y Aparatos de Medición.....	77
Figura 5-3	Sensor de Matriz Granular y su Medidor Digital (Tipo Watermark).....	77
Figura 5-4	Fotografía y Descripción Detallada del Sensor de Disipación de Calor.....	78
Figura 5-5	Sensor del Sicrómetro	79
Figura 5-6	Potenciómetro WP4 de Precisión Milimétrica DW4.....	80
Figura 5-7	Sonda de Equipotenciómetro (Tipo EQ2).....	81
Figura 5-8	Comparación entre los Rangos de Medición de Succión para Diferentes Equipos.....	83
Figura 5-9	Muestreo del Suelo utilizando un Cilindro de Volumen Conocido.....	84
Figura 5-10	Dispositivo Experimental de Sonda de Neutrones	85
Figura 5-11	Dispositivo Experimental de Sonda de Rayos Gamma.....	86
Figura 5-12	Aparato RDT y Sondas Utilizadas para Medir el Contenido de Agua	88
Figura 5-13	Sonda de Dominio de Frecuencia Tipo Echo	90
Figura 5-14	Equipo de Perforación Utilizado para la Instalación de los Tubos de Acceso	90
Figura 5-15	Sensor de Reflectometría en el Dominio de Amplitud Tipo Thetaprobe	92
Figura 5-16	Sensor Virrib Basado en la Técnica de Transmisión de Fase	92
Figura 5-17	Sonda TDT Utilizada en la Medición del Contenido Volumétrico de Agua	93
Figura 5-18	Rutas de Propagación de Ondas Electromagnéticas en un Suelo con Dos Capas de Permisividad Dieléctrica de Contraste	94
Figura 5-19	Equipo Portátil Tipo EM 38.....	95
Figura 5-20	Estación Meteorológica Instalada en el Campo	99
Figura 5-21	Dibujo Esquemático de Estación Atmosférica de Razón de Bowen	101
Figura 5-22	Representación Esquemática del Método del Microlisímetro	102
Figura 5-23	Diferentes Tipos de Muestreadores de Agua del Suelo	103
Figura 5-24	Dispositivo de Muestreo de Agua en un Área Vadosa no Saturada	103
Figura 5-25	Diagrama de un Lisímetro Utilizado en el Muestreo de Agua	104

Índice

Figura 5-26	Representación Esquemática de la Prueba Modificada de Consumo de Oxígeno	106
Figura 6-1	Como Transplantar Pastos mediante Esquejes o Hijuelos	122
Figura 6-2	Perfil Final de la revegetación de la cobertura de los Depósitos de Relaves 1 y 2	123
Figura 6-3	Perfil Final de la revegetación de la cobertura del Depósito de Relave de Milpo	125
Figura 6-4	Perfil Final de la revegetación de la cobertura del Depósito de Relaves de Quiulacocha- CENTROMIN – PERU.....	127
Figura 7-1	Ubicación geográfica de la mina Equity Silver	132
Figura 7-2	Plano de la mina Equity Silver: ubicación de botaderos y equipos de monitoreo (Weeks y Wilson 2005).....	132
Figura 7-3	Distribución de los Sensores de Conductividad Térmica	134
Figura 7-4	Perfil de humedad del suelo en NP4 de la mina Equity Silver	135
Figura 7-5	Perfil de Humedad del Suelo en NP7 de la Mina Equity Silver	135
Figura 7-6	Succión del Suelo a 58 cm de Profundidad de la Mina Equity Silver.....	136
Figura 7-7	Ubicación Geográfica de la Mina Rum Jungla	137
Figura 7-8	Mapa de la mina Rum Jungle (de Taylor et al. 2003a)	138
Figura 7-9	Ubicación de hoyo de sonda y pares de lisímetros en las pilas de White	140
Figura 7-10	Lluvias anuales e índice de infiltración	142
Figura 7-11	Índice de generación de sulfato.....	142
Figura 7-12	Mapa de la Mina Barrick Goldstrike.....	144
Figura 7-13	Ubicación de las estaciones de monitoreo de la mina Barrick Goldstrike.....	145
Figura 7-14	Profundidades de Instalación para Sensores de Monitoreo.....	146
Figura 7-15	Contenido de humedad del suelo vs. tiempo de cobertura de suelo superficial.....	146
Figura 7-16	Contenido de humedad del suelo vs. tiempo en la cobertura de Carlin.....	147
Figura 7-17	Variaciones de la succión cerca del talud medio superior en la cobertura de suelo superficial	147
Figura 7-18	Variaciones de la succión cerca del talud medio inferior en Carlin	148
Figura 7-19	Ubicación del emplazamiento de LTA (de Maqsoud et al. 2006).....	149
Figura 7-20	Foto Aérea del Emplazamiento de LTA.....	149
Figura 7-21	Vista en Plano Esquemático del Emplazamiento LTA	152
Figura 7-22	Evolución de Contenido Volumétrico de Agua	152
Figura 7-23	Evolución del Contenido Volumétrico de Humedad	153
Figura 7-24	Ubicación de la mina de oro Kidston	154
Figura 7-25	Esquema de Sistemas de Cobertura de Botadero de Desmonte	155
Figura 7-26	Contenido volumétrico de agua vs. el tiempo.....	156
Figura 7-27	Mapa que muestra la ubicación del área de explotación de Kristineberg y la Represa 1	157
Figura 7-28	Distribución del tamaño de grano de los materiales de relaves.....	157

Índice

Figura 7-29	Represa 1 de los relaves de planta concentradora y ubicación de estaciones de monitoreo.....	159
Figura 7-30	Vista Esquemática en Corte de las Instalaciones en la Represa 1.....	159
Figura 7-31	Sondas de Oxígeno	162
Figura 7-32	Mediciones de la Napa Freática Colada.....	162
Figura 7-33	Ubicación de la Mina Lorraine	163
Figura 7-34	Configuración de la Cobertura con los Instrumentos Instalados.....	164
Figura 7-35	Grado de Saturación y Perfiles de Succión para la Estación B-5	166
Figura 7-36	Grado de saturación y perfiles de succión para la Estación B-1.....	167
Figura 7-37	Flujo de oxígeno diario máximo estimado a través de la CEBC	167
Figura 7-38	Ubicación de diferentes casos de estudio de rehabilitaciones de minas	168

Acrónimos

ACRÓNIMOS

AEV	Air Entry Value (Valor de Entrada de Aire)
ARD	Acid Rock Drainage (Drenaje Ácido de Rocas)
CCBE	Cover with Capillary Barrier Effect (Cobertura con Efecto de Barrera Capilar)
DDL	Down Dip Limit (Límite Pendiente Abajo)
LAI	Leaf Area Index (Índice de Area Foliar)
MEM	Ministerio de Energía y Minas del Perú
PLF	Plan Limiting Factor (Factor Limitante de la Planta)
SDR	Store-Divert-Release (Coberturas de Almacenamiento-Derivación-Descarga)
SR	Store-Release (Coberturas de Almacenamiento-Descarga)
UBC	University of British Columbia
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue
WEV	Water Entry Value (Valor de Entrada de Agua)
WRC	Water Retention Curve (Curva de Retención de Agua)

Presentación

PRESENTACIÓN

La minería cumple un rol fundamental en la economía del Perú y constituye un gran factor de desarrollo. Es el primer proveedor de divisas y aporta hoy más del 60% del total de nuestros ingresos por exportaciones; no obstante, es también un generador de residuos, los cuales, si no son adecuadamente manejados, tienen el potencial de generar impactos ambientales que podrían permanecer mucho tiempo después del cierre de las operaciones. En particular, los relaves y desmontes de mina pueden contener sulfuros metálicos que, al quedar expuestos al oxígeno de la atmósfera, son oxidados y generan drenaje ácido, es decir, ácido sulfúrico y metales en solución, iniciando una fuente de contaminación que luego es muy difícil y costoso controlar.

La experiencia internacional demuestra no sólo que es viable desarrollar las actividades mineras cuidando el ambiente, sino que la excelencia ambiental constituye un imperativo ético imprescindible de solidaridad con las futuras generaciones y para el logro del Bien Común que es la causa final del Estado y la sociedad en todo sistema democrático que se expresa en la seguridad y el bienestar general de las personas sin distinción de raza, sexo, condición económico o de cualquiera otra índole.

En particular, con respecto al drenaje ácido, está demostrado que la mejor manera de evitar los impactos es prevenir su formación. Por tal motivo, es necesario que el diseño de las instalaciones para la disposición de residuos mineros sea capaz de prevenir la oxidación de los sulfuros contenidos en ellos. Esta labor puede resultar muy compleja después del cierre de la mina, cuando ya no se cuenta con el respaldo de una operación minera, su personal y los recursos que permitan implementar las medidas adecuadas de control. Sobre el particular, investigaciones desarrolladas en los últimos años en torno a la gestión de residuos mineros ha permitido contar con diseños efectivos de coberturas que previenen el contacto entre residuo minero y el oxígeno o el agua del entorno, evitando así la oxidación y la consecuente generación de drenaje ácido.

Es importante, pues, que la minería en nuestro país marche al ritmo del desarrollo de la tecnología minera, y es por ello que nos complace poder presentar esta Guía, elaborada con el concurso de expertos canadienses y peruanos, gracias a la colaboración de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional - ACDI a través del Proyecto de Reforma del Sector de Recursos Minerales del Perú - PERCAN.

Esta Guía será de gran utilidad para los responsables de las empresas mineras, consultores, funcionarios del Estado y para todas las personas e instituciones interesadas en el diseño y evaluación de las coberturas de los depósitos de relaves y desmontes en el marco de los planes de cierre.

El Ministerio de Energía y Minas renueva así su compromiso con los objetivos trazados por el Gobierno en la lucha contra la pobreza y en la promoción de las inversiones responsables en nuestro país.

Lima, 10 de setiembre de 2007

Arq. Juan Valdivia Romero
Ministro de Energía y Minas

1 INTRODUCCIÓN

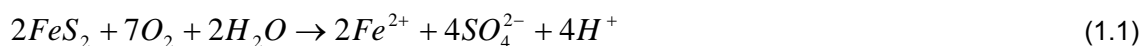
1.1 Drenaje Ácido de Rocas

Es comúnmente conocido que el agua superficial y el agua subterránea circundante de una mina pueden resultar significativamente afectadas por las actividades de una mina. En el primer texto escrito sobre calidad del agua de mina, Georgius Agrícola (1556, traducido por Hoover y Hoover en 1912) menciona:

“Luego de ser lavados los minerales, el agua que ha sido usada envenena los arroyos y quebradas y destruye a los peces o los aleja.”

Ésta es probablemente la primera referencia registrada sobre impactos ambientales mineros y el fenómeno del drenaje ácido de mina (problema común para muchas minas metálicas, de uranio y carbón).

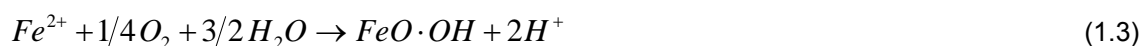
El Drenaje Ácido de Rocas (Acid Rock Drainage - ARD) puede generarse en o dentro de muchos componentes mineros como roca de desmonte, relaves, paredes del tajo abierto y labores mineras (e.g. SRK 1989; Morin y Hutt 1997). Los minerales sulfurosos como la pirita (que es el mineral sulfuroso más abundante) se oxidan cuando están expuestos lo cual genera ARD. Esto se realiza a través de diversas posibles vías químicas y bioquímicas. La oxidación de la pirita puede describirse con las siguientes ecuaciones (e.g. Kleinmann et al. 1981; Ritcey 1989; Blowes y Ptacek 1994; Evangelou 1995; Perkins et al. 1995; Morin et Hutt 1997). El primer paso es la oxidación directa de la pirita (FeS_2) por el oxígeno que produce sulfato (SO_4^{2-}), hierro ferroso (Fe^{2+}) y acidez (H^+):



En el siguiente paso, el hierro ferroso se oxida a hierro férrico (Fe^{3+}). Esta reacción es catalizada a un pH bajo por la presencia de bacterias (principalmente por la *Thiobacillus ferrooxidans*) aumentando el índice de reacción de 20 a 1000 veces (e.g. Berthelin 1987; Cook et al. 2000).



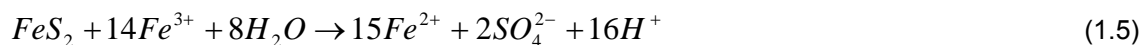
El hierro ferroso también puede ser oxidado para producir hidróxido de hierro ($FeO \cdot OH$) y acidez.



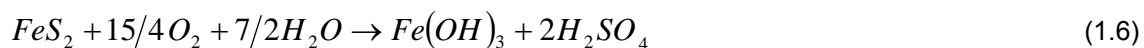
El Fe^{3+} es precipitado a un pH > 4 como hidróxido férrico ($Fe(OH)_3$), que luego libera más ácido al medio ambiente.



A un pH < 4, el hierro férrico se mantiene soluble y puede oxidar a la pirita directamente, liberando más ácido en el área circundante.

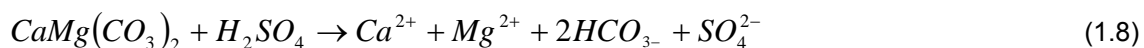
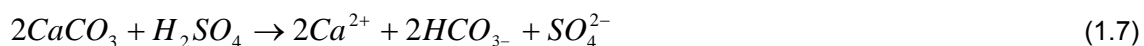


Toda la reacción para la completa oxidación de la piritita puede expresarse como sigue:



La oxidación de 1 mol de piritita genera dos moles de ácido sulfúrico. Por lo general, en la bibliografía se considera (e.g. Aubertin et al. 2002) que la oxidación directa por oxígeno (Ecuación 1.1) ocurre a un pH casi neutro ($5 < \text{pH} < 7$), mientras que la oxidación indirecta (Ecuación 1.5) se produce predominantemente a un pH menor ($\text{pH} < 3$). El índice de oxidación es una función de diferentes factores (Perkins et al. 1995) incluyendo suministro de oxígeno, temperatura, pH, actividad bacteriana, área de la superficie del mineral y cristalografía. Comúnmente se entiende que la Ecuación 1.2 controla el índice de la reacción. El índice de la reacción es bajo a un pH bajo y aumenta rápidamente a medida que el pH disminuye debido a la presencia de bacterias.

La calidad química del drenaje también dependerá de otros minerales presentes en los residuos mineros. El ácido en solución puede reaccionar y tornarse neutro con los carbonatos y minerales de silicatos, que son los principales minerales neutralizadores (e.g. Sverdrup 1990; Kwong 1993; Lawrence y Scheske 1997). Las Ecuaciones 1.7 y 1.8 representan dos reacciones posibles de neutralización de ácido sulfúrico (a $\text{pH} > 6.3$) por calcita ($CaCO_3$) y dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), respectivamente, que son dos minerales de carbonato abundantes (Lapakko 1994).



Las ecuaciones muestran que son necesarios dos moles de calcita y 1 mol de dolomita para neutralizar 1 mol de ácido sulfúrico. La capacidad de neutralización mineral para reducir la producción de ARD también depende de los diferentes factores que afectan la reactividad de los minerales (ej. temperatura, pH, presión de CO_2 , área superficial del mineral y cristalografía). La reactividad de los minerales de carbonato pueden clasificarse desde los más reactivos hasta los menos reactivos: calcita \geq dolomita $>$ Mg-ankerita $>$ ankerita $>$ siderita (Blowes et Ptacek, 1994). Puede encontrarse mayor detalle sobre el proceso de neutralización en residuos mineros en otras publicaciones (e.g. Sverdrup 1990; Blowes et Ptacek 1994; Lapakko 1994; Sherlock et al. 1995; Aubertin et al. 2002; Jambor et al. 2002).

1.2 Métodos de Control de ARD

Cuando el potencial de neutralización de una cantidad determinada de residuos mineros es menor que el potencial de acidificación, se generará ARD y consecuentemente se adoptarán medidas apropiadas en el sitio de almacenamiento de residuos. En los últimos años se han propuesto diferentes técnicas para reducir los impactos ambientales del ARD. Una de éstas, consiste en coleccionar el agua ácida que drena de los residuos mineros antes de su descarga al ambiente y tratarlo químicamente para producir un efluente final que cumpla con los estándares ambientales. La principal desventaja de esta técnica es la necesidad de operar un sistema de tratamiento de ARD por décadas, o incluso siglos, después del cierre de la mina. Otro método para controlar la producción de ARD proveniente de los relaves

mineros o rocas de desmonte es eliminar uno (o más) de los tres componentes principales de las reacciones de oxidación: oxígeno, agua y minerales de sulfuro.

Se ha propuesto la desulfurización ambiental para restringir la producción de ARD proveniente de los relaves mineros (McLaughlin y Stuparyk 1994; Humber 1995; Bussièrre et al. 1995; Benzaazoua y Bussièrre 1999; 2000a, b; Bois et al. 2005). Ésta consiste en separar una cantidad suficiente de sulfuros (en base a la neutralización potencial) de los relaves mineros. Con este proceso se obtienen dos fracciones diferentes que se deben manejar, los relaves desulfurizados que no generan ARD y una cantidad menor de relaves rico en sulfuro que genera acidez. Con este método, es posible reducir significativamente el volumen de los relaves generadores de acidez que se debe manejar en la superficie especialmente cuando el concentrado puede ser utilizado como relleno subterráneo.

Pueden emplearse coberturas elaboradas con suelos de baja conductividad hidráulica o con materiales sintéticos para limitar el ingreso de agua (como las geomembranas o geocompuestos de bentonita). Algunas minas en Québec actualmente están empleando estas coberturas para reducir la producción de ARD (Bienvenu y Dufour 1996; Lewis y Gallinger 1999). La configuración de estas coberturas es similar a los diseños desarrollados para el aislamiento de residuos domésticos y peligrosos (e.g. Aubertin y Chapuis 1991b; Daniel y Koerner 1993; Rowe et al. 2004). En climas áridos, las coberturas con efectos de barrera capilar también pueden reducir la infiltración de agua (e.g. Williams et al. 1997; Zhan et al. 2001; Albright et al. 2005). Este tipo de cobertura será discutido con mayor detalle más adelante en esta Guía.

Por lo general, se considera que la creación de barreras de oxígeno es la mejor opción para reducir el ARD (SRK 1989). Se han propuesto métodos diferentes para disminuir la migración descendente de oxígeno. Por ejemplo, puede emplearse una cobertura de agua para reducir la disponibilidad de oxígeno en los materiales reactivos (e.g. Fraser y Robertson 1994; Amyot y Vézina 1997; Adu-Wusu et al. 2001; Simms et al. 2001). Las coberturas elaboradas con materiales que consumen oxígeno como residuos de madera, estiércol y paja u otros residuos orgánicos (e.g. Tremblay 1994; Tassé et al. 1997; Cabral et al. 2000) son también efectivas. Otra manera de limitar la migración de oxígeno es con el uso de una cobertura con efectos de barrera capilar (Covers with Capillary Barrier Effect - CCBE) (e.g. Rasmuson and Erikson 1986; Aubertin et al. 1995; Bussièrre et al. 2003). Este tipo de cobertura tiene por objetivo reducir la migración de oxígeno manteniendo una de las capas a un alto grado de saturación. El alto contenido de agua (o grado de saturación) en la capa origina un coeficiente bajo de difusión de gas que, a su vez, permite un bajo flujo de gas (descendente o ascendente). En el Capítulo 4 se proporciona mayor detalle sobre los efectos de la barrera capilar y las CCBE.

1.3 Objetivos y Contenido de la Guía

El principal objetivo de esta Guía es presentar una metodología para la aplicación de sistemas de coberturas para el cierre de los depósitos de relaves y desmonte de mina. En esta guía se presentan los dos tipos principales de coberturas de materiales naturales empleadas para rehabilitar sitios mineros con ARD: las Coberturas de Almacenamiento-Derivación-Liberación (Storage-Diversion-Release - SDR) y las Coberturas con Efectos de Barrera Capilar (CCBE). Las coberturas "estándar" (denominadas coberturas de baja conductividad hidráulica saturada) elaboradas con materiales geosintéticos y/o suelo arcilloso no se discuten en esta Guía. Estas

coberturas ya han sido descritas anteriormente por algunos autores (ver Daniel y Koerner, 1993, y Rowe et al., 2004, para mayor detalle).

De manera más específica, el principal objetivo del trabajo es resumir el conocimiento existente sobre los principios fundamentales, diseño, construcción, instrumentación y monitoreo de sistemas de coberturas empleados para disminuir el drenaje de mina proveniente de la roca de desmonte y relaves. La presente Guía está basada principalmente en la experiencia desarrollada en la *École Polytechnique de Montréal*, la *Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue* (UQAT) y la *University of British Columbia* (UBC) y sus colaboradores, así como en los resultados de investigaciones recientes e implementación práctica de los sistemas de coberturas a nivel internacional.

La Guía se divide en siete capítulos. Luego de esta breve introducción, el Capítulo 2 que presenta los principios fundamentales para el funcionamiento de los sistemas de coberturas empleados para el control de la generación de ARD. Los principales aspectos que se discuten son la teoría del flujo saturado y no saturado, desplazamiento del gas a través de los medios porosos, propiedades del suelo no saturado, el fenómeno denominado efectos de la barrera capilar y las interacciones del suelo y atmósfera. Este capítulo tiene por objetivo resumir la teoría de los dos tipos de coberturas discutidos en esta guía y proporcionar referencias clave para los interesados en estudiar más a profundidad estos principios teóricos.

El Capítulo 3 presenta las coberturas SDR empleadas para controlar la filtración de agua en los residuos mineros. Después de una breve descripción de los conceptos sobre este tipo de cobertura, se presentan los principales parámetros que afectan el rendimiento de una SDR, seguidos por la influencia del talud sobre la capacidad para la derivación del agua. Luego se presenta un método que consta de siete pasos para diseñar una cobertura SDR. El capítulo termina con una lista de puntos que deben ser evaluados para el diseño de una cobertura SDR eficaz.

El Capítulo 4 está dedicado a la construcción de coberturas CCBE para reducir la migración de oxígeno y, consecuentemente, la generación de ARD. Primero se presenta la configuración típica de una cobertura CCBE seguida de los principales parámetros que afectan el desempeño de la referida cobertura, con énfasis en el impacto de la geometría. Al igual que con la cobertura SDR, se propone un método para el diseño de una cobertura CCBE seguido de una serie de preguntas y respuestas que evalúan la calidad y ayudan en la definición de una propuesta de diseño determinada.

La instrumentación y el monitoreo son importantes en la evaluación del desempeño de las coberturas SDR y CCBE. En ambos casos, el desempeño se relaciona con el comportamiento hidráulico de los sistemas de cobertura. De ahí que, los parámetros principales a monitorear para ambos tipos de cobertura (CCBE y SDR) sean: succión de la matriz, contenido volumétrico de agua, flujo del oxígeno (para CCBE), parámetros meteorológicos, flujo y calidad del agua. En el Capítulo 5, se presentan las diferentes técnicas que permiten la medición de estos parámetros seguidas de una evaluación corta. Para cada método, se presenta una breve descripción conjuntamente con sus principales ventajas y desventajas. El capítulo también discute la frecuencia del monitoreo y el número de las estaciones de monitoreo que deben instalarse para un monitoreo eficaz.

El Capítulo 6 se relaciona con los aspectos de vegetación de las coberturas. En ambos tipos de sistemas de coberturas (SDR y CCBE), la vegetación afectará el desempeño de la cobertura. En el caso de las coberturas SDR, la vegetación

aumentará principalmente el potencial de retorno del agua a la atmósfera mediante el fenómeno de transpiración que es un efecto beneficioso para el desempeño de la cobertura. Por otro lado, la vegetación puede afectar de manera negativa el desempeño de la CCBE extrayendo el agua de la capa de retención de humedad y luego aumentando el flujo de difusión del oxígeno a través de la cobertura. Este capítulo abarca los diferentes aspectos de la vegetación en las minas, como la vegetación de relaves y roca desmonte, criterios para seleccionar las especies más adaptadas y métodos de siembra. El capítulo concluye con una presentación de los diferentes sitios mineros del Perú en donde se ha implementado un programa de vegetación, incluyendo la adición de diferentes capas de suelo.

El Capítulo 7 presenta casos bien documentados sobre rehabilitación de sitios mineros con sistemas de coberturas: Equity Silver (Canadá), Rum Jungle (Australia), Mina Barrick Goldstrike (USA), Les Terrains Aurifères (LTA; Canadá), Mina de Oro Kidston (Australia), Mina Kristineberg (Suecia), y Mina Lorraine (Canadá). Cuatro de estos sistemas de coberturas fueron construidos para actuar como una barrera de oxígeno y para limitar (pero no eliminar) la percolación del agua (Equity Silver, LTA, Mina Kristineberg y Lorraine), mientras que las otras tres coberturas incluyen una cobertura SDR empleada para reducir la percolación del agua. Para cada caso, se presenta una breve descripción de los parámetros geográficos conjuntamente con información sobre el clima, la naturaleza del mineral explotado, tipo de cobertura instalada sobre los residuos mineros y una breve presentación del desempeño de la cobertura.

1.4 Limitaciones de la Guía

Tal como se mencionara anteriormente, la Guía enfoca dos tipos de sistemas de coberturas: coberturas, CCBE y SDR. Los otros métodos que pueden emplearse para recuperar los sitios mineros, como las coberturas consumidoras de oxígeno, coberturas de agua, coberturas de baja conductividad hidráulica saturadas (elaborada con materiales como arcilla, geomembrana, asfalto y concreto, para mencionar algunos), enmiendas de residuos mineros con materiales neutralizadores, etc., no se discuten en este documento.

El documento propone una metodología para diseñar sistemas de coberturas en los sitios de disposición de residuos mineros. No es la intención de esta Guía presentar una receta de aplicación general debido a que el diseño de los sistemas de cobertura involucra datos específicos al sitio que deben ser adecuadamente evaluados y utilizados en el diseño. El documento también contiene muchas referencias y la descripción de los estudios casos que podría ayudar durante el diseño de un sistema de cobertura. Asimismo, se discute brevemente en el desempeño a largo plazo. Sin embargo, es importante resaltar que incluso si los sistemas de coberturas para residuos mineros son diseñados para un tiempo de vida determinado, que algunas veces puede ser mayor a cien años, en la actualidad tenemos menos de quince años de experiencia en la construcción y desempeño comprobado de estas coberturas. El estudio realizado por Wilson et al. (2003) sobre el desempeño a largo plazo de las coberturas existentes instaladas en los residuos mineros demuestra que algunas coberturas de desempeñan bien mientras que otras podrían no alcanzar los objetivos del diseño. Es opinión de los autores que los sistemas de coberturas construidos siguiendo la metodología propuesta en el presente documento tendrán desempeños que se acercarán mucho más a los objetivos que se buscaron inicialmente.

2 PRINCIPIOS TEÓRICOS

Antes de presentar los diferentes sistemas de cobertura colocados sobre desmonte y relaves, es importante recordar algunos aspectos teóricos relacionados con el flujo saturado y no saturado a través de medios porosos (ecuaciones fundamentales, propiedades de suelos no saturados, y efectos de barrera capilar) y con el desplazamiento de gas a través de las coberturas (en ambas direcciones – hacia arriba debido a la interacción suelo-atmósfera y hacia abajo debido a la difusión molecular). Estos aspectos se relacionan directamente con los componentes del balance de agua de las coberturas (precipitación, evapotranspiración, almacenamiento de agua, infiltración, desviación lateral y escorrentía) y, en consecuencia, el rendimiento de las coberturas para limitar la infiltración de agua y/o migración de oxígeno.

2.1 Flujo de agua a través de los materiales de cobertura

Las ecuaciones fundamentales del flujo de agua a través de un medio poroso se resumen a continuación. Puesto que los materiales de cobertura por lo general son no saturados y el énfasis generalmente se encuentra en el comportamiento transitorio de la cobertura, se debe resolver una ecuación generalizada del flujo de agua para predecir el comportamiento de las coberturas colocadas sobre desechos mineros.

El primer concepto que se debe recordar es la ecuación de continuidad. Un elemento del suelo en el dominio Cartesiano x , y , z , con una dimensión Δx , Δy y Δz se presenta en la Figura 2-1. La diferencia entre el flujo de Darcy (o específico) de entrada y de salida (el volumen del agua que pasa a través del elemento del suelo en una dirección por unidad de tiempo) en la dirección x se puede definir como:

$$\Delta q_x = q_x \Delta y \Delta z - [q_x + (\partial q_x / \partial x) \Delta x] \Delta y \Delta z \quad (2.1)$$

La diferencia entre el flujo específico de entrada y salida (denominado en el presente almacenamiento) debe ser igual a la acumulación de agua en el elemento por unidad de tiempo:

$$\Delta q = -(\partial q / \partial x) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.2)$$

El almacenamiento también se puede definir como el contenido volumétrico de agua (θ) (volumen de agua / volumen total) en el tiempo multiplicado por el volumen de suelo.

$$\Delta q = (\partial \theta / \partial t) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.3)$$

Al igualar las ecuaciones 2.2 y 2.3, se puede escribir:

$$(\partial \theta / \partial t) \Delta x \Delta y \Delta z = -(\partial q / \partial x) \Delta x \Delta y \Delta z \text{ o } \partial \theta / \partial t = -\partial q / \partial x \quad (2.4)$$

La ecuación 2.4 se puede generalizar agregando componentes “ y ” y “ z ”:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

Los parámetros q_x , q_y , q_z representan el flujo de Darcy en la dirección “x”, “y” y “z”, respectivamente.

Otra ecuación importante para representar el flujo de agua en los suelos es la ley de Darcy. Esta ley, originalmente propuesta para suelos saturados, permite evaluar el flujo de Darcy (o específico):

$$q = - \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} + k_y \frac{\partial h}{\partial y} + k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

en donde h es la carga hidráulica y k la conductividad hidráulica saturada. Richards (1931) amplió la ley de Darcy para suelos no saturados proponiendo que k sea una función de la succión (ψ) (i.e., $k = k(\psi)$) y no una constante.

$$q = - \left(k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} + k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} + k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

Para ampliar la ley para condiciones transitorias, es necesario integrar la ecuación de continuidad (Ecuación 2.5). Al reemplazar q en la Ecuación 2.4 por la Ecuación 2.7, se obtiene la siguiente ecuación:

$$- \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.8)$$

Sabiendo que al descuidar la presión hidrodinámica en la ecuación de Bernouilli, la carga hidráulica (h) puede expresarse en la sumatoria de la presión (o succión) y la carga gravitacional ($h = \psi + z$), la Ecuación 2.8 se puede volver a escribir del siguiente modo:

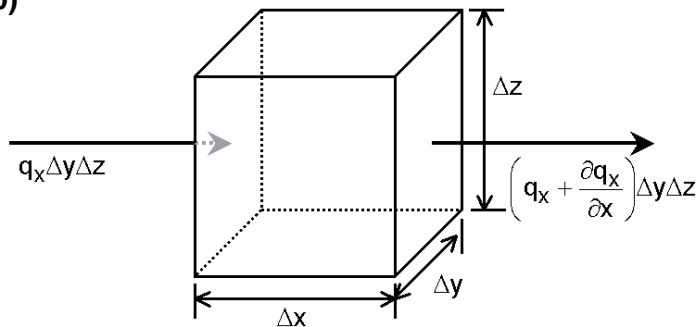
$$- \left(\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.9)$$

Puesto que $\partial z / \partial x$ y $\partial z / \partial y$ son igual a cero, y $\partial z / \partial z$ es igual a uno, la Ecuación 2.9 se convierte en:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial k(\psi)}{\partial z} \quad (2.10)$$

La Ecuación 2.10 definió el flujo del agua a través de medio no saturado como los suelos usados para construir coberturas sobre desmonte y relaves. Ésta es la ecuación usada por las herramientas utilizadas para predecir la distribución de agua y presión en medios no saturados para condiciones transitorias. Mayores detalles sobre el flujo de agua a través medios saturados y no saturados se pueden encontrar en Hillel (1980), Fredlund y Rahardjo (1993).

Figura 2-1 Flujo del Agua a través de un Elemento de Suelo (inspirada en Hillel 1980)



2.2 Flujo de Oxígeno a través de Materiales de Cobertura

Algunas coberturas se elaboran para limitar la disponibilidad de oxígeno en los relaves reactivos manteniendo una (o más) de las capas de cobertura cerca de la saturación y, en consecuencia, creando una barrera de oxígeno (ver detalles en el Capítulo 4). El flujo de oxígeno (o gas) a través de la cobertura se puede evaluar calculando los flujos difusivos y advectivos.

2.2.1 Flujo Difusivo

Las leyes de Fick se usan comúnmente para evaluar el transporte por difusión para elementos en un estado soluble (e.g., Freeze y Cherry 1979; Shackelford 1991), así como en la fase gaseosa (por ejemplo, Troeh et al. 1982; Reardon y Moddle 1985). En las ecuaciones correspondientes (que se presentan más adelante), la variación de la concentración en el transcurso del tiempo se refiere al coeficiente de difusión efectiva del material D_e , y también al coeficiente de difusión del elemento en un medio libre (no obstruido). El flujo de oxígeno $F(z, t)$ y la concentración $C(z, t)$ en la posición z y tiempo t se determinan a partir de primera y segunda ley de Fick, dadas para la difusión unidimensional como (Hillel 1980):

$$F(z, t) = -\theta_{eq} D^* \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} = -D_e \frac{\partial C(z, t)}{\partial z} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_{eq} C) = \frac{\partial}{\partial z} (\theta_{eq} D^* \frac{\partial C}{\partial z}) = \frac{\partial}{\partial z} (D_e \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (2.12)$$

En estas ecuaciones, $F(z, t)$ es el flujo difusivo de O_2 [$ML^{-2}T^{-1}$]; θ_{eq} es una porosidad equivalente (difusión) [L^3L^{-3}]; D^* y D_e son los coeficientes de difusión bruta y efectiva, respectivamente, [L^2T^{-1}] (con $D_e = \theta_{eq} D^*$); $C(z, t)$ es la concentración de O_2 intersticial en la fase de aire en el tiempo t [T] y posición z [L]. El signo menos en la ecuación 2.11 significa que el flujo va de las regiones de concentración alta a baja. En las ecuaciones 2.11 y 2.12, la porosidad equivalente θ_{eq} se usa en lugar de θ_a , que se ha usado a menudo en el pasado (Yanful 1993; Aubertin et al. 1995). Para un medio altamente saturado, θ_{eq} es necesario evaluar adecuadamente el flujo de oxígeno con las leyes de Fick, como muestra Collin (1987), tomando en cuenta el flujo en la fase de aire y el flujo de oxígeno disuelto en la fase de agua. Esta porosidad equivalente se define como (Aubertin et al. 2000):

$$\theta_{eq} = \theta_a + H\theta_w \quad (2.13)$$

en donde H es la constante de equilibrio de Henry sin dimensiones dada por la proporción $H=C_w/C_a$ (para oxígeno, $H \cong 0,03$ a 20°C).

Asumiendo que hay un consumo rápido y completo del O_2 justo debajo de la cobertura (debido a la oxidación de sulfuro) y que sólo una capa de cobertura impide el desplazamiento de oxígeno, una solución para la ecuación (2.11) se puede escribir como:

$$F_{s,L} = \frac{C_0 D_e}{L} \quad (2.14)$$

en donde $F_{s,L}$ es flujo de oxígeno en estado estable [$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-1}$ o $\text{MoleL}^{-2}\text{T}^{-1}$] en la base de la cobertura, C_0 es la concentración de oxígeno en la atmósfera ($8,62$ mol de oxígeno por m^3), y L [L] es el espesor de la barrera de oxígeno.

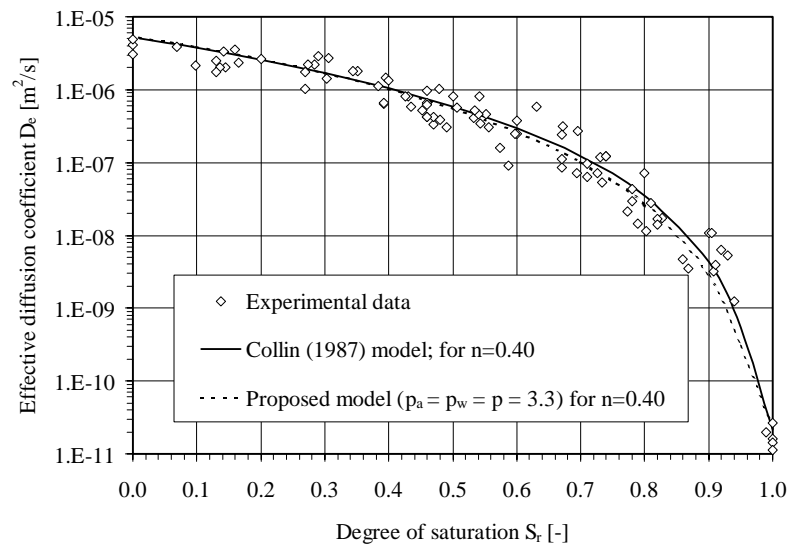
Los cálculos de flujo de oxígeno se evalúan considerando que prevalecen las condiciones de estado estable; el flujo de oxígeno en condiciones de estado estable es mayor que en condiciones transitorias (ver Mbonimpa et al. 2003 para conocer detalles). Además, el tiempo requerido para alcanzar condiciones de estado estable es de unos días a algunos meses (Mbonimpa et al. 2003), lo cual significa que el uso de Ecuación 2.14 sobreestima el flujo de oxígeno real. La Ecuación 2.12 es válida sólo para la difusión a través de un material inerte en donde no ocurre la generación o consumo de O_2 . La segunda ley de Fick se puede modificar para considerar la concentración variable de la sustancia en desplazamiento debido a la reacción con el medio. Este aspecto no se discutirá más en la presente Guía, pero el lector interesado puede encontrar ecuaciones que representan flujo de oxígeno a través de coberturas reactivas en Mbonimpa et al. (2003).

La evaluación de $F_{s,L}$ requiere el conocimiento de D_e , que se puede medir en el laboratorio (e.g., Aubertin et al. 1995, 2000) o estimar por expresiones semi-empíricas y de propiedades de materiales básicos, como la porosidad y el grado de saturación. Se ha propuesto diferentes expresiones en la literatura (por ejemplo, Millington and Quirk 1961; Millington y Shearer 1971; Collin 1987). Achib et al. (2004) propusieron lo siguiente:

$$D_e = \frac{1}{n^2} (D_a^0 \theta_a^{p_a} + H D_w^0 \theta_w^{p_w}) \quad (2.15)$$

En esta ecuación, D_a^0 y D_w^0 son el coeficiente de difusión de oxígeno libre en aire y en agua, respectivamente; a temperatura ambiente $D_a^0 \cong 1,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y $D_w^0 \cong 2,5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ (Scharer et al. 1993). Los exponentes p_a y p_w se relacionan con los coeficientes de tortuosidad para las fases de aire y agua, que a su vez se pueden relacionar con propiedades básicas (θ_a y θ_w). Se obtuvieron buenos estimados de D_e usando un valor fijo $p_a = p_w = 3,3$ (para un n promedio de $0,4$; ver Figura 2-2).

Figura 2-2 Comparación entre Valores de Coeficiente de Difusión



Comparación entre los valores de coeficiente de difusión medidos en diferentes materiales a varios S_r , con valores estimados obtenidos con el modelo de Collin (1987) y la ecuación (2.16).

2.2.2 Flujo Advectivo

El oxígeno también se puede transportar a relaves reactivos infiltrando agua. Para calcular este flujo de oxígeno advectivo, balance de agua de la cobertura basado en una condición climática típica se debe estimar usando datos meteorológicos directos medidos en el lugar o enfoques indirectos. El flujo de oxígeno advectivo asociado con este flujo de infiltración $F_0^{C,i}$ [$ML^{-2}T^{-1}$ o $Mol L^{-2}T^{-1}$] se da por la siguiente ecuación:

$$F_0^{C,i} = F_w^i C_w \quad (2.16)$$

en donde F_w^i [$L^3L^{-2}T^{-1}$] es la descarga específica de agua, C_w [ML^{-3}] es la concentración de oxígeno disuelto en el agua (9,2 gramos de oxígeno por m^3).

2.3 Propiedades de Suelo No Saturado

Las dos funciones principales que se usan para describir el comportamiento de un material granular no saturado son la curva de retención de agua (Water Retention Curve - WRC) y la función de permeabilidad k_u . La WRC usualmente expresa el contenido volumétrico de agua θ con respecto a la succión aplicada ψ . De modo similar, la función k_u representa la conductividad hidráulica insaturada a succiones variables.

2.3.1 Curva de Retención de Agua (WRC)

La WRC representa la capacidad de un material de retener agua a cierta presión negativa (o succión). Las propiedades insaturadas de materiales como la resistencia al corte, conductividad hidráulica, y compresibilidad se pueden vincular con su WRC (Fredlund y Rahardjo, 1993). La Figura 2-3 presenta una WRC típica, de relaves de grano fino y desmonte. La forma de estas curvas muestra la distribución de agua que es una función de la distribución de tamaño de poro y la geometría de poro del

material. Cuando los porosos son más pequeños, la tensión capilar puede ser mayor y puede permanecer saturada en succiones mayores (de manera similar que para los relaves con respecto al desmonte en la Figura 2-3). La forma de la WRC también depende del proceso hidráulico involucrado (en húmedo o seco); este fenómeno se denomina efectos de histéresis (e.g., Hillel 1980). La WRC tiene parámetros importantes como:

- El valor de entrada de aire (Air Entry Value - AEV o ψ_a) representa la succión a la cual el material empieza a desaturarse. El AEV por lo general se toma como la intersección entre las tangentes de la parte totalmente saturada y la parte desaturada de la WRC (ver Figura 2-3).
- El valor de entrada de agua (Water Entry Value - WEV o ψ_w) es el punto en donde, en un proceso de humectación (o succión decreciente), el agua empieza a infiltrarse en el material (Bussiére, 1999). Este punto también se denomina succión residual ψ_r .

La WRC se puede medir en el laboratorio o en el campo. En el campo, se puede medir instalando sensores de succión y sensores de contenido volumétrico de agua (los cuales se tratan más ampliamente en el Capítulo 5) en ubicaciones especificadas en el terreno (e.g., Fredlund y Rahardjo, 1993; Aubertin et al. 1997; Ricard et al. 1997). En el laboratorio, se pueden usar diferentes mediciones como (Fredlund y Rahardjo, 1993): papel filtro; Psicrómetro; pruebas de columnas drenadas; celdas Tempe; extractor de placas de presión.

Las mediciones obtenidas con las técnicas antes señaladas producen una serie de puntos en el plano θ - ψ . Para obtener la WRC completa, es necesario usar modelos suavizantes de curvas. Existen cuatro tipos de modelos basados en su formulación matemática (Bussiére, 1999):

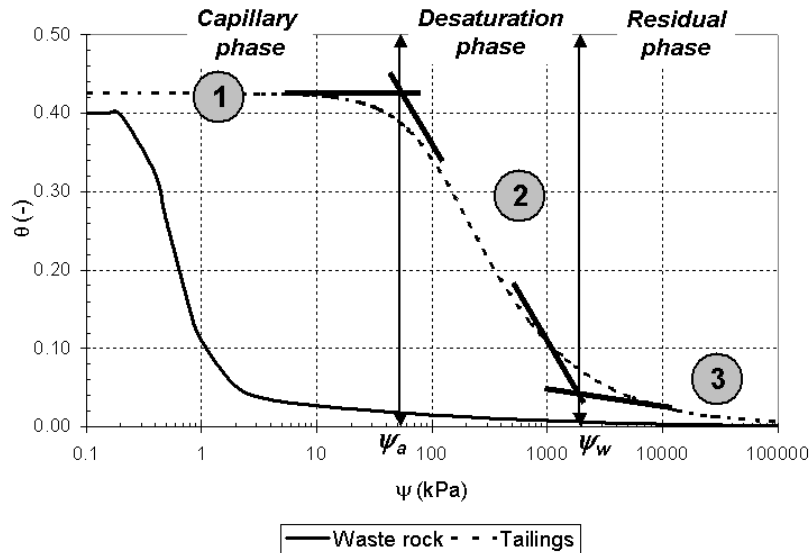
- Modelos exponenciales;
- Modelos de ley de potencias;
- Modelos de coseno hiperbólico;
- Modelos polinomiales; y
- Modelos de funciones de error.

En estos modelos, las constantes (o parámetros de materiales) dependen de las propiedades básicas de material granular como la distribución del tamaño de las partículas y porosidad (Aubertin et al., 1998). Los modelos que se usan más comúnmente son los de Gardner (1958), Brooks y Corey (1964), van Genuchten (1980) y Fredlund y Xing (1994). Los primeros son todos los modelos de ley de potencias mientras que el último es un híbrido entre los modelos exponenciales y los de ley de potencias. La Tabla 2.1 muestra las principales ecuaciones de modelos usados para la descripción de la WRC de puntos experimentales.

2.3.2 Función de Permeabilidad

Como se observa en la ecuación 2.10, la relación entre k y ψ (denominada función de permeabilidad k_u) se debe conocer para predecir el desplazamiento de agua en suelos insaturados. La Figura 2-4 muestra la k_u de dos materiales, un material grueso (desmonte) y un material más fino (relaves). Debido a que el material grueso escurre con mayor facilidad que el material fino hay cierto punto (Punto A \approx 2 kPa, en la Figura 2-3) en donde la conductividad hidráulica del material fino se vuelve mayor que la del material grueso. El aire contenido en los poros del material grueso crea obstáculo para el desplazamiento del agua, lo cual reduce la conductividad hidráulica.

Figura 2-3 Curvas de Retención de Agua de Muestras de Relaves Mineros y Desmante



Nota: Datos tomados de Martin et al., 2004, 2005. La WRC de relaves incluye las Tres Fases Principales de Desaturación.

Figura 2-4 Curvas de Conductividad Hidráulica Insaturada de Relaves Mineros y Desmante (Datos de Martin et al., 2004, 2005)

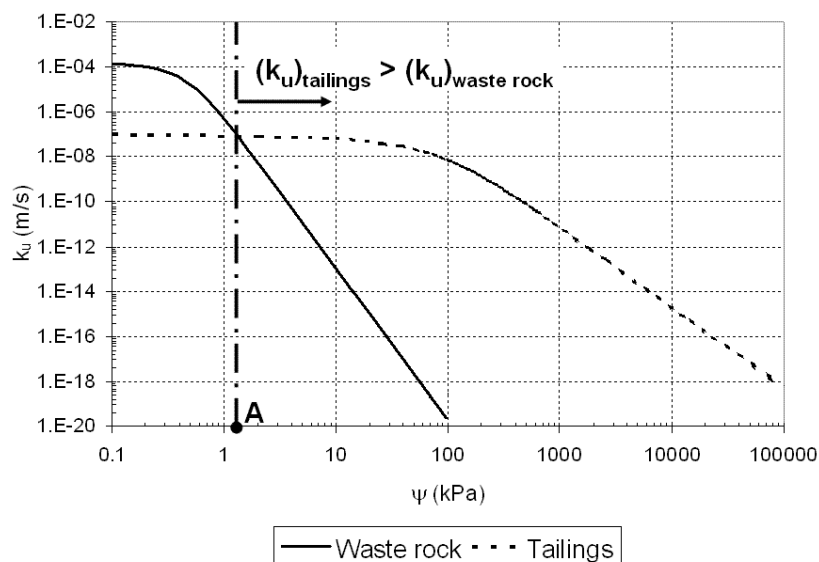


Tabla 2-1 Ecuaciones de Modelos Usados para Describir la Curva de Retención de Agua de Materiales Granulares (adaptada de Bussière, 1999)

Brooks et Corey (1964)

$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{\psi_a}{\psi} \right)^{\lambda_{BC}} \quad (2.17)$$

- θ_e = Contenido volumétrico de agua reducido (m^3/m^3);
- θ = Contenido volumétrico de agua (m^3/m^3);
- θ_s = Contenido volumétrico de agua saturado (cuando $\psi = 0$ kPa);
- θ_r = Contenido volumétrico de agua residual (m^3/m^3);
- λ_{BC} = Parámetro de alisamiento vinculado con la estructura del poro (m^3/m^3);
- ψ_a = Valor de entrada de aire (kPa);
- ψ = Succión (kPa).

Gardner (1958)

$$\theta_e = \left(\frac{1}{1 + a_G \psi^{n_G}} \right) \quad (2.18)$$

- a_G y n_G = Constantes del modelo de Gardner (1958) (-).

van Genuchten (1980)

$$\theta_e = \left(\frac{1}{1 + (\alpha_{VG} \psi)^{n_{VG}}} \right)^{m_{VG}} \quad (2.19)$$

- α_{VG} , m_{VG} y n_{VG} = Constantes del modelo de van Genuchten (1980) (-).

Fredlund et Xing (1994)

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + (\psi/a_f)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}} \quad \text{con } C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left[1 + (\psi/\psi_r) \right]}{\ln \left[1 + (1000000/\psi_r) \right]} \quad (2.20)$$

- e = Número neperiano (2,71828);
- a_f = Valor Aproximado de ψ_a ;
- n_f = Parámetro de alisamiento que controla la pendiente del punto de inflexión de la WRC;
- m_f = Parámetro de alisamiento de la curva vinculado con el contenido de agua residual y la función de corrección $C(\psi)$;
- ψ_r = Succión a la cual el contenido volumétrico de agua es igual a su valor residual.

La función de permeabilidad de un material se puede obtener a través de mediciones de laboratorio o de campo. Por ejemplo, una de las técnicas de laboratorio consiste en aplicar una succión constante a una muestra colocada entre dos placas de cerámica de entrada de aire altas. Luego se aplica un suministro de agua en la parte superior de la muestra. Cuando el flujo se encuentra en estado estable (el volumen de flujo de entrada y de salida son iguales), se puede calcular la conductividad hidráulica para la succión determinada. Se han desarrollado otras técnicas de medición, para evaluar la conductividad hidráulica no saturada (por ejemplo, Hillel 1980; Klute y Dirksen 1986; Fredlund y Rahardjo 1993; Dirksen 1999). Es de amplio conocimiento que la medición de k_u puede ser tediosa, tomar mucho tiempo y ser costosa, además, la exactitud de algunos resultados de la prueba a menudo es relativamente deficiente (Dirksen 1999). Asimismo, se reconoce que por lo general es más práctico predecir k_u a partir de la

conductividad hidráulica saturada k_{sat} (la determinación de k_{sat} está bien registrada en los libros de texto de hidrogeología o en estándares) y la WRC.

Una vez que se conocen la k_{sat} y la WRC, se puede usar varios modelos para obtener la función de permeabilidad en el plano $k-\psi$. Los tres tipos principales se han identificado como: empírico, macroscópico y estadístico. Puesto que los modelos estadísticos son los que se usan con mayor frecuencia, los otros dos tipos no se tratarán con mayor detalle en el presente documento.

La mayoría de los modelos predictivos estadísticos requieren que se hagan presunciones que simplifican las cosas para permitir su uso. Por ejemplo, todos los modelos presentados líneas arriba suponen un flujo laminar en los poros. Adicionalmente, los modelos estadísticos asumen que (Mualem 1986):

- El medio poroso se considera como una serie de poros interconectados distribuidos al azar en la muestra.
- Se supone que la ecuación es válida a nivel de poros y se puede usar para estimar la conductividad hidráulica del poro. Al integrar los poros que contribuyen al flujo del agua, es posible calcular la conductividad hidráulica global.
- La curva de retención de agua se considera representativa de la función de distribución de tamaño de poro.

Algunos modelos estadísticos requieren métodos numéricos para obtener soluciones (por ejemplo, Fredlund et al., 1994) mientras que expresiones analíticas simplificadas están disponibles para otros modelos (por ejemplo, Burdine, 1953; Mualem, 1976). Aunque los modelos tratados en el presente son relativamente complejos, constituyen el método más eficiente para obtener la curva de función de permeabilidad de un material. Éstos se usan con mayor frecuencia que los métodos de caracterización de laboratorio. La Tabla 2-2 presenta los modelos más populares que se usan para definir la conductividad hidráulica con respecto a la succión.

2.4 Efectos de Barrera Capilar

Las coberturas que usan efectos de barrera capilar se han propuesto como una alternativa para las coberturas de conductividad hidráulica saturadas bajas (por ejemplo, Fayer et al. 1992; Morris y Stormont 1997). La efectividad de este tipo de cobertura depende de un fenómeno denominado efecto de barrera capilar. Este efecto está presente cuando se coloca un material de grano fino sobre uno más grueso sobre la napa freática. Ambos materiales tienen distintas propiedades hidrogeológicas debido a sus diferentes texturas. En la fase de desactivación posterior al ingreso de agua, la capa de material de grano fino retendrá agua con mayor facilidad debido a sus poros intersticiales más pequeños. Puesto que el material grueso escurre, la presencia de gas en su espacio de poros reduce la interconectividad de espacios vacíos rellenos de agua, reduciendo de este modo la conductividad hidráulica (k ; ver Figura 2-4). Esta reducción de la k en la capa gruesa impide el flujo vertical de material de grano fino de arriba, y también ayuda a controlar la magnitud de la succión (presión de poro negativa) en la interfase entre los dos materiales durante un periodo de tiempo (los efectos de barrera capilar son un fenómeno transitorio que dependen de las propiedades de los materiales). En consecuencia, el material de grano fino se comporta como un reservorio en donde se puede almacenar agua por las fuerzas capilares.

Tabla 2-2 Algunos modelos usados para Describir la Conductividad Hidráulica

Modelo	Tipo	Ecuaciones	Variables
Gardner (1958)	Empírico	$k_{rel} = \frac{k}{k_{sat}} = \exp(a_s \psi)$ $k = k_{sat} \text{ cuando } \psi \leq \psi_a$	k_{rel} = Conductividad hidráulica relativa con respecto a k_{sat} . a_s = Número de porción
Rijtema (1965)	Empírico	$k_{rel} = \frac{k}{k_{sat}} = \exp[a_s(\psi + \psi_a)]$ $\text{cuando } \psi_a \leq \psi \leq \psi_r$	
Mualem (1986)	Macroscópico	$k_r = \theta_e^\delta \text{ cuando } \theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	θ_e = contenido volumétrico de agua normalizado. δ = parámetro matemático (valor entre 2 y 4 dependiendo de los autores). Se usa un valor de 3 típicamente
Burdine (1953)	Estadístico	$k_{rel} = \theta_e^l \left[1 - \left(1 - \theta_e^{1/m_v} \right)^{m_v} \right]$ en donde $m_v = 1 - 2/n_v$	l = Parámetro que representa la interconectividad de los poros (se usa 4/3 ó 1 típicamente) m_v = parámetro matemático
Mualem (1976)	Estadístico	$k_{rel} = \theta_e^\lambda \left[1 - \left(1 - \theta_e^{1/m_v} \right)^{m_v} \right]^2$ en donde $m_v = 1 - 2/n_v$	Ver modelo de Burdine (1953)
Fredlund et al. (1994)	Estadístico	$k_r \approx \frac{\left(\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{\bar{y}_i}) - \theta(\psi)}{e^{\bar{y}_i}} \theta'(e^{\bar{y}_i}) \right)}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{\bar{y}_i}) - \theta_s}{e^{\bar{y}_i}} \theta'(e^{\bar{y}_i}) \right)}$	N = Número de sub-intervalos i = Variable de recuento j_{cc} = Número de intervalo \bar{y}_i = Punto medio del intervalo i_{cc}^e

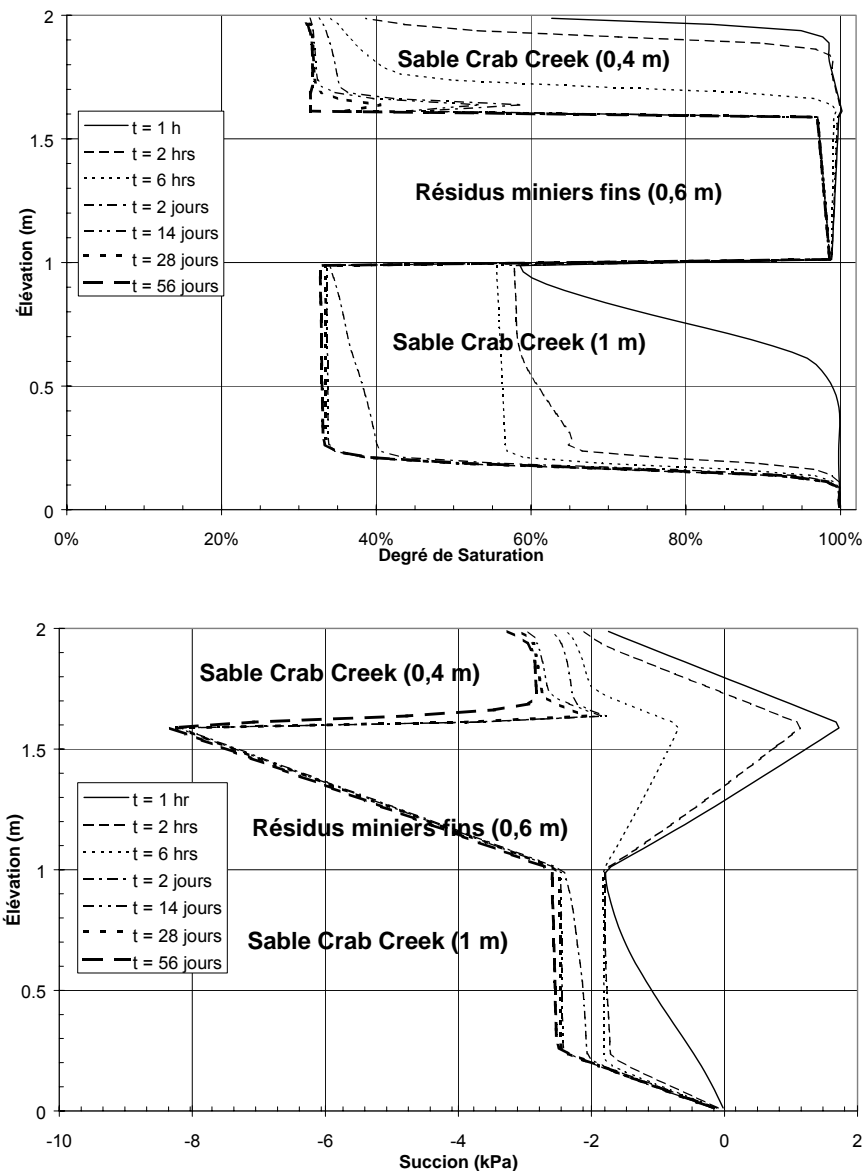
Algunos modelos usados para Describir la Conductividad Hidráulica insaturada de suelos (adaptada de Aubertin y Bussiére, 2001 y Bussiére, 1999).

Los perfiles típicos de contenido volumétrico de agua y succión (obtenidos usando herramientas numéricas; ver Aubertin et al. 1996 para conocer los detalles) se presentan para un sistema de tres capas en la Figura 2-5 (ver Aubertin et al. 1996 y Capítulo 4 para conocer los detalles). Se puede ver que hay un quiebre en el perfil de succión en la parte inferior del material de grano grueso. Esto implica que, hasta cierto punto, la succión no se incrementa con elevación en esta capa para permitir la continuidad de flujo y presión en la interfase con el material de grano fino. Este comportamiento es típico de un sistema con efectos de barrera capilar. La succión relativamente baja en la interfase reduce los valores de succión en el material de grano fino (que se incrementan respecto de la interfase linealmente con elevación) y, en consecuencia, el material puede mantener un alto contenido volumétrico de agua. También se puede observar que el material de grano grueso rápidamente escurre y llega al contenido volumétrico residual. La Figura 2-5 también muestra que los efectos de barrera capilar están presentes entre el material de grano grueso superior y el material de grano fino. La succión es reducida en la interfase para respetar las condiciones de equilibrio (flujo y presión) y el contenido volumétrico de agua en la

capa de arena superior es bajo y es similar al de la parte inferior. La Figura 2-5 presenta un comportamiento hidráulico típico de una cobertura bien diseñada con efectos de barrera capilar.

Para conocer mayores detalles acerca de los efectos de barrera capilar el lector interesado se puede remitir a numerosas publicaciones que se pueden encontrar en la literatura (por ejemplo, Nicholson et al. 1989; Akindunni et al. 1991; Morel-Seytoux, 1992; Aubertin et al. 1995, 1996; O'Kane et al. 1998; Bussièrè et al., 2003).

Figura 2-5 Perfiles de Contenido Volumétrico de Agua y Succión



Perfiles de contenido volumétrico de agua (parte superior) y succión (inferior) para un sistema de tres capas con efectos de barrera capilar (Aubertin et al. 1996).

2.5 Interacciones Suelo-Atmósfera

Las interacciones suelo-atmósfera influyen en el rendimiento de los sistemas de cobertura para la rehabilitación de desechos mineros. El índice de evaporación en la

superficie de un sistema de cobertura es una función de las condiciones atmosféricas forzosas (es decir, precipitación y la evaporación potencial) y propiedades del suelo. Los flujos dentro del continuum suelo/atmósfera están totalmente acoplados en términos de transferencia de calor y de masa. Wilson et al. (1994) proporciona la siguiente ecuación para el flujo de agua líquida y vapor de agua dentro de los perfiles de cobertura:

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w^1 \frac{\partial}{\partial y} \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right] + C_w^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right] \quad (2.18)$$

en donde h_w es la carga hidráulica (m), C_w^1 es el módulo de variación de volumen con respecto a la fase de agua líquida ($= 1/\rho_w g m_w^2$), C_w^2 es el módulo de variación de volumen con respecto a la fase de vapor de agua ($= (P+P_v)/(P(\rho_w)^2 g m_w^2)$), D_v es el coeficiente de difusión para el vapor de agua a través del suelo (kg-m/kN-s), ρ_w es la densidad de agua líquida (kg/m³), g es la aceleración debido a la gravedad (m/s²), m_w^2 es la pendiente de la curva característica de suelo-agua (1/kPa), P es la presión atmosférica total (kPa), y P_v es la presión parcial en el suelo debido a vapor de agua (kPa).

El flujo de interfase de agua líquida y vapor de agua está acoplado con la transferencia de calor como se indica a continuación:

$$C_h \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_v \left(\frac{P+P_v}{P} \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

donde C_h es el calor específico volumétrico (J/m³-°C), T es la temperatura (°C), λ es la conductividad térmica (W/m-°C), y L_v es el calor latente de vaporización (J/kg).

La solución para la Ecuación (2.18) y (2.19) durante eventos de infiltración se logra aplicando un flujo igual a la intensidad de las lluvias en el primer término en la derecha de la Ecuación (2.18). La solución para los eventos de evaporación es igualmente completa puesto que el índice de la evaporación real es determinado por el índice de evaporación potencial establecido por las condiciones climáticas y por la succión en la superficie del suelo. El índice de evaporación real es igual al índice potencial de evaporación hasta que el valor de la succión en la superficie del suelo es mayor que aproximadamente 3000 kPa Wilson et al (1997). El valor de la evaporación real disminuye progresivamente con la succión creciente cuando la succión del suelo es mayor que 3000 kPa. La disminución de la evaporación ocurre debido a la depresión de la presión de vapor dentro de espacios vacíos del suelo con succión creciente. Edlefsen y Anderson (1943) señalan la siguiente relación para la humedad relativa y succión:

$$RH = e^{\frac{\psi W_v}{RT}} \quad (2.20)$$

RH es la humedad relativa de la superficie del suelo como una función de la succión total, ψ es la succión total en el suelo (kPa), W_v es el peso molecular de agua (0,018 kg/mol), R es la constante de gas universal (8,314 J/mol/°K), y T es la temperatura mínima absoluta (°K).

El valor de evaporación potencial y evaporación real de la superficie de la cobertura se pueden determinar usando la forma modificada del método de Penman (1948)

divulgado por Wilson et al (1994) para calcular la evaporación real del suelo como se indica a continuación:

$$E = \frac{\Delta Q_n + \gamma E_a}{\Delta + A} \quad (2.21)$$

en donde E es el flujo evaporativo (mm/día), Δ es la pendiente de curva de presión de vapor de saturación vs. temperatura a la temperatura media del aire (mmHg/°C), Q_n es la energía radiante disponible en la superficie (mm/día), y γ es la constante psicrométrica. En la Ecuación 2.21, $E_a = f(u)e_a(B-A)$ en donde $f(u) = 0,35(1 + 0,146Wa)$, Wa es la velocidad del viento (km/h), e_a es la presión de vapor de agua encima de la superficie del suelo (mmHg), B es la inversa de la humedad relativa en el aire, y A es la inversa de la humedad relativa en la superficie del suelo.

La solución para la Ecuación 2.18 y 2.19 requiere una condición de límite de la superficie para la temperatura:

$$T_s = T_a + \frac{1}{\gamma(f(u))} (Q_n - E) \quad (2.22)$$

en donde T_s es la temperatura de la superficie del suelo (°C) y T_a es la temperatura del aire encima de la superficie del suelo (°C). Las soluciones generales para la Ecuación 2.18 a través de 2.22 para calcular las condiciones de infiltración, evaporación y flujo de agua dentro del perfil de cobertura de suelo se pueden obtener usando códigos numéricos como el modelo para computadora *SoilCover* (Unsaturated Soil Group, 1997).

La influencia de absorción del agua de la raíz debido a la transpiración de la planta se debe incluir en el cálculo de la ET cuando la cobertura de suelo se vegeta. Tratch et al (1995) mostró cómo se puede implementar esto usando una forma modificada del método propuesto por Ritchie (1972). El método proporcionado por Tratch et al. (1995) se basa en tres variables del principio para calcular la transpiración real de la planta. Éstos son el índice del área de la hoja (Leaf Area Index - LAI), factor limitante de planta (Plant Limiting Factor - PLF) y profundidad de la raíz. El LAI se calcula como el área de la superficie total de las hojas dentro de un dosel determinado dividido por el área de la superficie del terreno debajo del dosel. En general, el índice de transpiración potencial de la planta es igual a la evaporación potencial cuando la LAI es mayor que 2,7. El índice potencial de transpiración disminuye de acuerdo con las relaciones empíricas señaladas por (1972) cuando el LAI es menor que 2,7. El índice real de la absorción del agua de la raíz se calcula posteriormente como el producto de transpiración potencial y PLF.

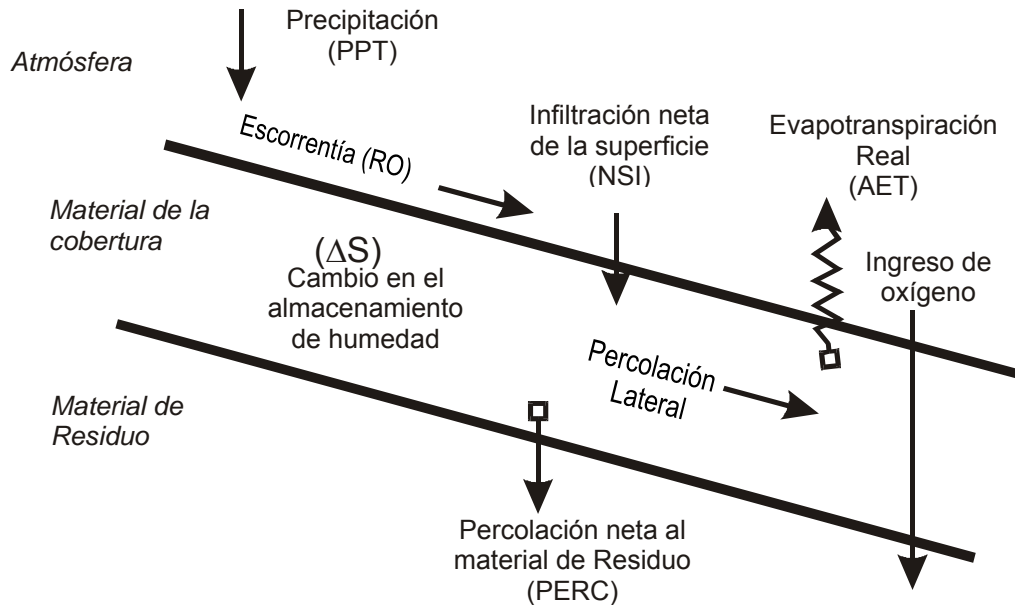
El PLF se calcula como una función del perfil de succión de matriz en la zona de la raíz. Feddes et al. (1978) mostraron que para la mayoría de las plantas, el PLF por lo general es igual a 1 para valores de succión de matriz menores de 100 kPa; y disminuye en una escala log a medida que la succión aumenta 150kpa. El paso final en la aplicación del índice de extracción de agua de la raíz al sistema de cobertura es distribuir la absorción computada en la profundidad de la raíz especificada. Prasad (1988) mostró que el usar una distribución lineal que disminuye a cero con la profundidad es una presunción adecuada.

3 COBERTURAS DE ALMACENAMIENTO Y DESCARGA Y COBERTURAS DE ALMACENAMIENTO, DESVIACIÓN Y DESCARGA

Un modo de limitar la generación de ARD consiste en controlar la infiltración del agua mediante la construcción de sistemas de cobertura en los sitios de disposición de residuos de mina. Para el diseño y la construcción de coberturas se emplean diversos materiales y configuraciones (Koerner y Daniel 1997). Al respecto, existe una solución interesante (aún en proceso de desarrollo) que consiste en utilizar los efectos de la barrera capilar (cobertura de almacenamiento y descarga) para controlar la infiltración del agua en la superficie de los sitios de disposición de residuos. Dichos sistemas diseñados atraen actualmente un considerable interés por representar una alternativa ventajosa frente a las coberturas más tradicionales basadas en materiales con una baja conductividad hidráulica saturada (e.g., Morris y Stormont 1997; Ward y Gee 1997; Dwyer 2001; Zhan et al. 2001; Scanlon et al. 2005). Las ventajas principales de una cobertura con barrera capilar radican en su relativa simplicidad, estabilidad a largo plazo y sus costos de construcción potencialmente más bajos en comparación con las coberturas más tradicionales basadas en materiales (suelos naturales y/o geosintéticos) con una baja conductividad hidráulica saturada (por ejemplo, Morris y Stormont 1997). Las coberturas de Almacenamiento y Descarga (Store-Release - SR) o las coberturas de Almacenamiento, Derivación y Descarga (Store-Divert-Release SDR; que corresponde a una cobertura SR colocada en una superficie inclinada) pueden resultar muy convenientes para minimizar la infiltración de las precipitaciones en los residuos y para controlar la lixiviación potencial de los contaminantes provenientes de los residuos en condiciones áridas y semiáridas (e.g., Williams et al. 1997; Zornberg y Caldwell 1998; Benson et al. 2001; Fourrie y Moonsammy 2002). Nótese que para este tipo de coberturas se pueden encontrar diversos nombres distintos en bibliografía relacionada con el tema, tales como coberturas “alternativas”, “con equilibrio hídrico” o “de evapotranspiración” (e.g., Ogorzalek et al. 2005).

Una cobertura SDR clásica comprende una capa de suelo de grano fino colocada sobre un material más grueso. El material grueso de la base puede estar conformado por los residuos de la mina, si es que el contraste hidráulico entre este material y el suelo de grano fino es lo suficientemente acentuado (e.g., Zhan et al. 2001); también se pueden agregar más capas para que la cobertura sea más efectiva. En el caso de una cobertura construida en un área plana, el efecto de la barrera capilar en la interfaz entre los materiales finos y gruesos permite que la capa de suelo más fino almacene el agua de ingreso, la cual puede ser descargada posteriormente por evaporación. En las áreas con declive, la cobertura con barrera capilar funciona también como un sistema de desviación de agua lateral. La Figura 3-1 muestra un equilibrio hídrico clásico de una cobertura SDR. El objetivo de la cobertura es tener suficiente escorrentía, evapotranspiración, almacenamiento y filtración lateral (en el caso de las coberturas inclinadas) para evitar la infiltración de agua en los residuos de la mina.

Figura 3-1 Curvas de Retención de Agua de los Materiales Típicos Utilizados en una Cobertura SDR (MEND 2001)



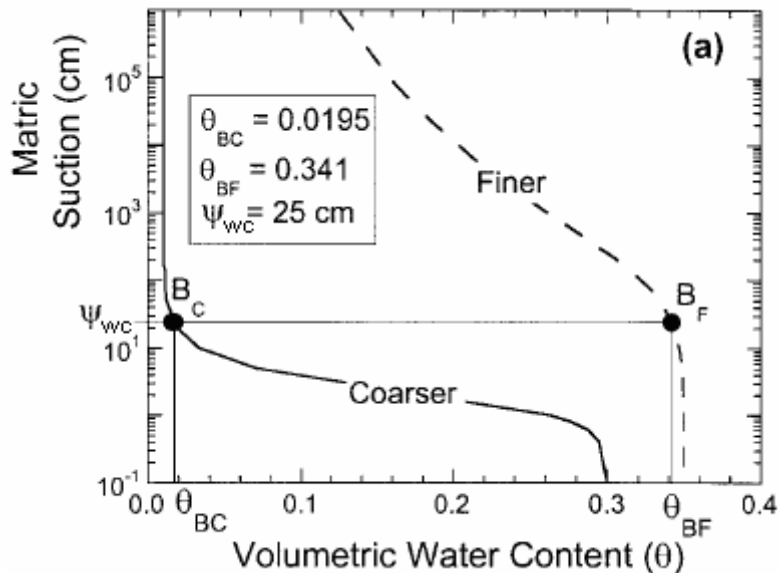
3.1 Cobertura SR

Cuando se aplica precipitación sobre una cobertura SR que utiliza los efectos de la barrera capilar (inicialmente seca), el agua se acumula en el material de grano fino hasta que la presión en la interfaz alcance el valor de la entrada del agua ψ_{wC} del material de grano grueso (Punto B_C en la Figura 3-2). En esta succión (o presión), el contenido volumétrico de agua en la capa de grano grueso es igual a θ_{BC} . La continuidad hidráulica en la interfaz requiere que la presión sea igual en ambos materiales. Como resultado, la presión en el material de grano fino debe ser igual al ψ_{wC} que corresponde al contenido volumétrico de agua (en el Punto B_F) de θ_{BF} en el material de grano fino; en este caso en particular, ψ_{aF} es igual a ψ_{wC} . Como se puede observar en la Figura 3-2, en caso de un contraste importante entre los dos materiales (es decir, $\psi_{aF} \geq \psi_{wC}$) el agua no empezará a filtrar significativamente a través del material de grano grueso hasta que la capa de grano fino esté casi saturada. Posteriormente el agua almacenada en la capa de grano fino es descargada de regreso a la atmósfera mediante evapotranspiración. Es importante señalar también que aun si se alcanza la succión crítica en la interfaz (ψ_{wC}), el flujo de agua puede ser bajo durante un periodo considerable, debido a la baja conductividad hidráulica no saturada (k_u) del material de grano grueso al ψ_{wC} (véase la Figura 3-2). En el Capítulo 2 se ofrecen más detalles acerca de los efectos de la barrera capilar.

Los principales parámetros que controlan el desempeño de las coberturas SR son las propiedades no saturadas de los materiales (la curva de retención de agua y la función de permeabilidad), el espesor de las capas, las condiciones climáticas (especialmente los eventos de precipitación extrema) y la inclinación de la cobertura (Khire et al. 2000; Aubertin et al. 2006). En los siguientes párrafos se presenta el impacto de los primeros tres parámetros, mientras que el impacto de la pendiente se analiza en la sección siguiente. Otros factores tales como erosión, vegetación, intrusión de biota y

agrietamiento por desecación podrían afectar también el desempeño de una cobertura SR o SDR, pero estos aspectos no serán tratados en este estudio.

Figura 3-2 Curvas de Retención de Agua de los Materiales Típicos Utilizados en una Cobertura SDR (de Khire et al. 2000)



3.1.1 Impacto de las Propiedades del Suelo No Saturado

Khire et al. (2000) presentó un estudio paramétrico numérico para investigar el impacto de las propiedades del suelo no saturado en el desempeño de las coberturas SR. Los autores utilizaron el modelo *UNSAT-H* (Fayer y Jones 1990) que puede simular el comportamiento hidráulico unidimensional de los suelos no saturados. El modelo tiene algoritmos constitutivos para simular el flujo no saturado, la evaporación y la transpiración (Fayer y Jones 1990; Khire et al. 1999). Las propiedades del suelo no saturado de los cuatro materiales de grano fino (CL, SM, SM-ML y ML) y de los dos materiales de grano grueso (SP y GP) estudiados se muestran en la Figura 3-3. Estos suelos cubren un amplio rango de propiedades de suelo no saturado. La estratigrafía de la cobertura simulada fue suelo de grano fino de 30 cm suprayacente a una capa de material grueso de 70 cm de espesor. Las condiciones climáticas aplicadas en la parte más alta fueron las de Wanatchee, EE.UU. (1992-1993). Se asumió que la vegetación sobre las coberturas sería Cheatgrass. En el documento original de Khire et al. (2000) se pueden encontrar mayores detalles sobre el modelo numérico y las condiciones de los límites.

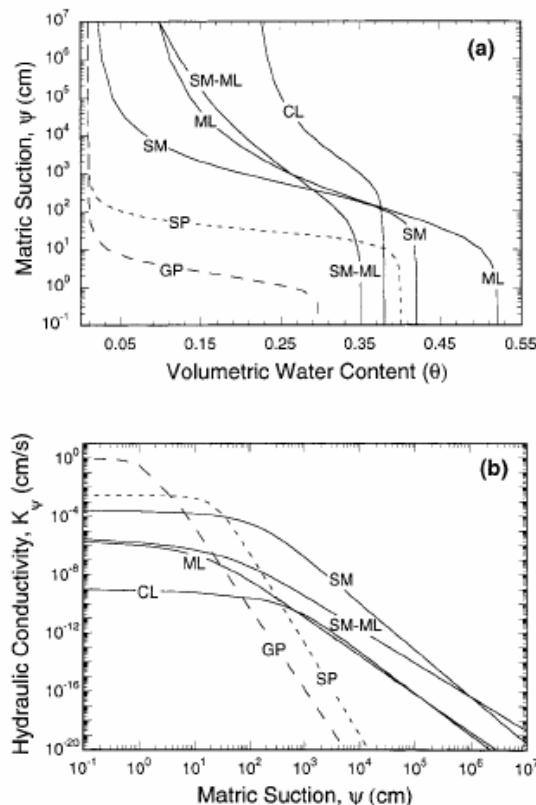
La Figura 3-4 muestra los resultados principales de las simulaciones, donde se puede ver que la infiltración a través de la cobertura SR disminuye de 1,4 a 0,15 cm cuando se utiliza ML o SM-ML (códigos que corresponden al sistema de clasificación USCS) en lugar de SM. El material CL redujo la filtración a un valor insignificante. Sin embargo, debido a que los materiales arcillosos son altamente susceptibles a la desecación, la cual produce grietas e incrementa significativamente el flujo de agua a través del material, (por ejemplo, Benson y Othman 1993; Chapuis 2002; Eigenbrod 2003), no se harán más análisis sobre el material CL.

Coberturas de Almacenamiento

El almacenamiento del agua del suelo es más estable (y menor) para los suelos más finos (SM-ML y ML) que para el material SM. Esto se puede deber principalmente a la mayor escorrentía acumulada para los suelos SM-ML y ML (para el material SM no se pronostica ninguna escorrentía); la evapotranspiración también es menor para los suelos finos debido a la poca cantidad de agua disponible. Estos resultados muestran claramente la importancia de las propiedades no saturadas del material de grano fino en el desempeño de una cobertura SR para limitar la infiltración de agua. De forma ideal, el suelo debe retener el agua que puede ser descargada posteriormente a la atmósfera y favorecer también la escorrentía. Es más, el suelo debe ser resistente al agrietamiento por desecación para evitar el flujo de agua preferencial a través de la cobertura. Para la capa de retención de humedad se suelen preferir los suelos SM, SM-ML y ML en lugar de los suelos arcillosos, ya que poseen las cualidades mencionadas anteriormente.

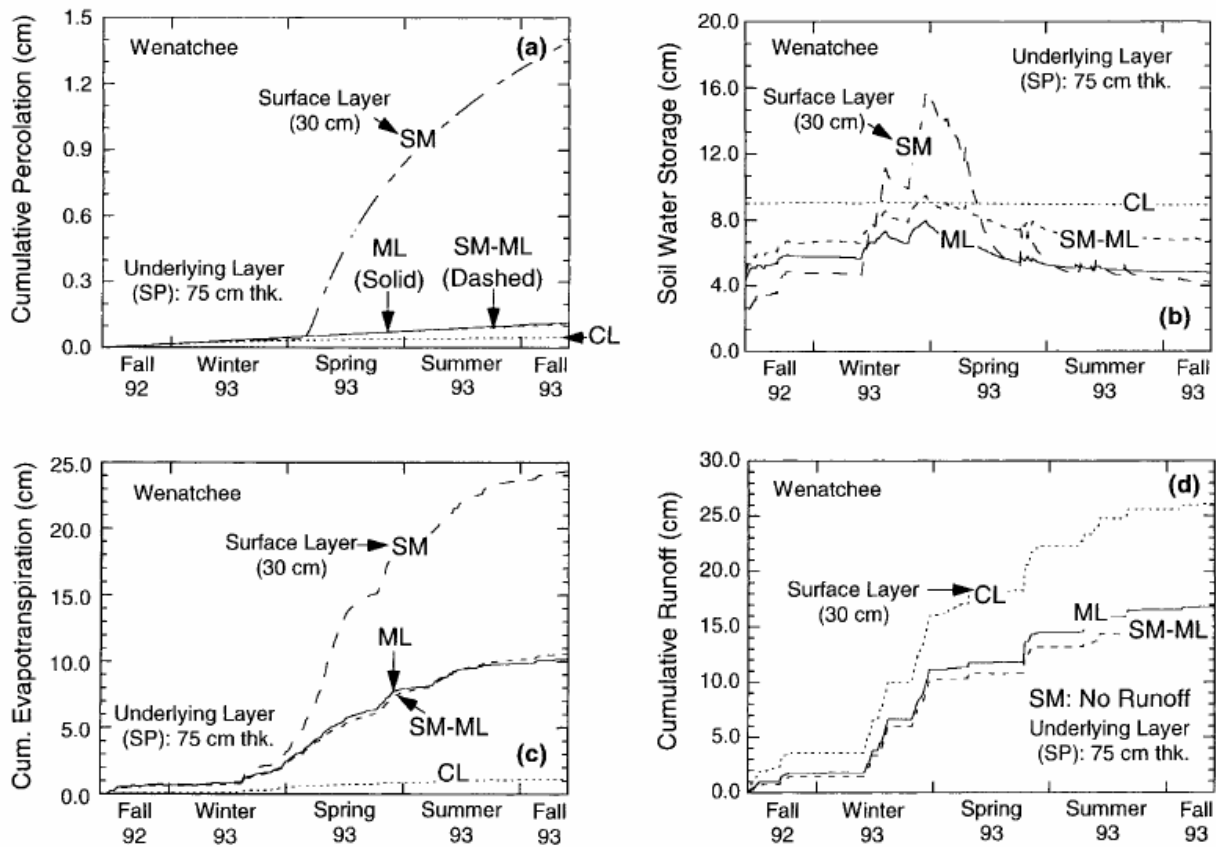
Los autores también han investigado el impacto de las propiedades no saturadas del material de grano grueso subyacente. Para la cobertura hecha de 30 cm de material SM expuesta a las condiciones climáticas de Wenatchee se modelaron dos materiales diferentes para la capa de ruptura capilar de 75 cm: arena (SP) y grava (GP) (véanse las propiedades no saturadas de ambos suelos en la Figura 3-3). La Figura 3-5 presenta algunos de los resultados: se puede apreciar que la capacidad de almacenamiento es ligeramente mayor cuando se utiliza suelo GP. Sin embargo, debido a la mayor conductividad hidráulica no saturada, la filtración acumulada en la base es más alta. Estos resultados muestran que, cuando el contraste hidráulico entre los suelos es significativo, el impacto de la capa de grano grueso no es tan significativo como el impacto de la capa de grano fino.

Figura 3-3 Propiedades Hidráulicas No Saturadas de los Materiales Utilizados en el Estudio Numérico Paramétrico (Khire et al. 2000)



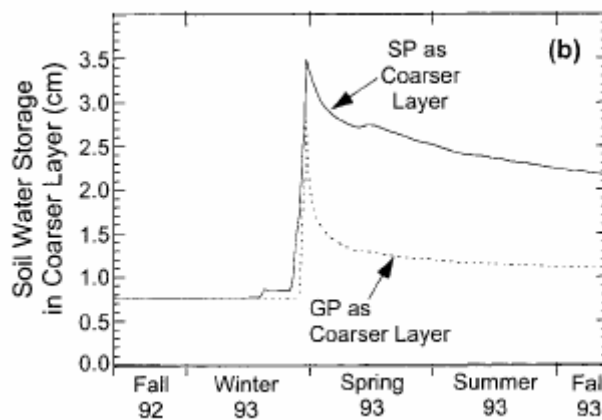
Coberturas de Almacenamiento

Figura 3-4 Impactos de las Propiedades No Saturadas del Material de Grano Fino en la Infiltración del Agua



Impactos de las Propiedades No Saturadas del Material de Grano Fino en la Infiltración del Agua a través de las Coberturas (Khire et al. 2000).

Figura 3-5 Impactos de las Propiedades No Saturadas del Material de Grano Grueso en la Infiltración del Agua

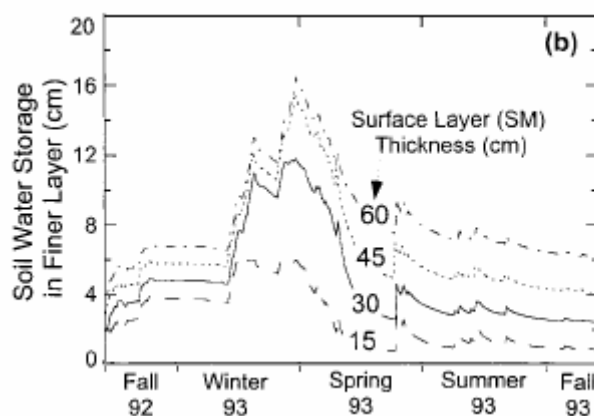


Impactos de las Propiedades No Saturadas del Material de Grano Grueso en la Infiltración del Agua a través de las Coberturas (Khire et al. 2000).

3.1.2 Impacto del Espesor de la Capa

Khire et al. (2000) hicieron la simulación de cuatro coberturas SR con cuatro capas de retención de humedad de diferente espesor (15, 30, 45 y 60 cm de SM) para las condiciones climáticas de Wenatchee (el espesor de la capa de grano grueso se fijó en 75 cm). Los resultados presentados en la Figura 3-6 muestran que la filtración disminuye a medida que el espesor de la capa de grano fino se incrementa; este efecto se atribuye principalmente a la mayor capacidad de almacenamiento de agua de las capas más gruesas. El impacto del incremento del espesor de la capa de grano fino es más acentuado en los espesores menores, por ejemplo, la filtración de agua se reduce de 5,8 a 1,4 cm (que corresponde a una reducción de la filtración de 4,4 cm) cuando el espesor se incrementa de 15 a 30 cm, mientras que se reduce en aproximadamente 0,2 cm más cuando el espesor se incrementa de 45 a 60 cm. Debido a que el almacenamiento de agua del suelo es mayor para la capa de retención de humedad más gruesa, la cantidad de agua transferida a la atmósfera por evapotranspiración también es mayor (véase la Figura 3-6).

Figura 3-6 Impactos del Espesor de la Capa de Retención de Humedad



Impactos del Espesor de la Capa de Retención de Humedad (de Grano Fino) en la Infiltración del Agua a través de las Coberturas (Khire et al. 2000).

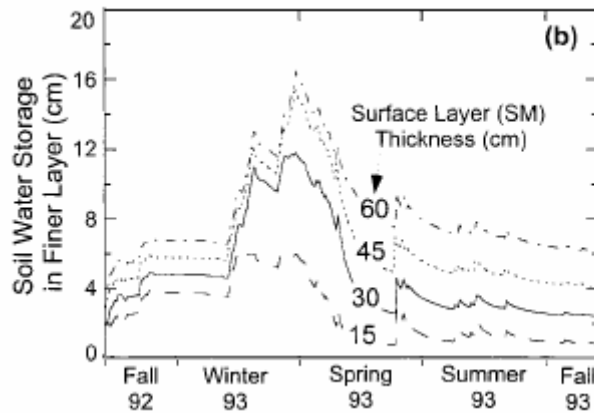
Khire et al. (2000) también evaluaron el impacto del espesor de la capa de grano grueso en el desempeño de una cobertura SR. La cobertura estaba formada por una capa de retención de humedad de 30 cm de espesor, hecha de SM, colocada sobre una capa de grano grueso de 75 o 45 cm de espesor hecha de SP. Nuevamente se utilizaron las condiciones climáticas de Wenatchee para realizar las simulaciones. Los resultados, presentados en la Figura 3-7, mostraron que aunque el espesor tiene un impacto en la filtración de agua acumulada, este impacto es menor comparado con el impacto del espesor de la capa de retención de humedad.

3.1.3 Impacto de las Condiciones Climáticas

Se evaluó el impacto de las condiciones climáticas en una cobertura SR hecha de una capa de grano fino (de retención de humedad) de 30 cm de espesor colocada sobre una capa de grano grueso de 75 cm de espesor. Se probaron cuatro condiciones climáticas diferentes típicas de años lluviosos en Wenatchee, Reno, Phoenix y Denver (véanse los detalles en Khire et al. 2000).

Coberturas de Almacenamiento

Figura 3-7 Impactos del Espesor de la Capa de la Base (de Grano Grueso) en la Infiltración del Agua a través de las Coberturas (Khire et al. 2000)



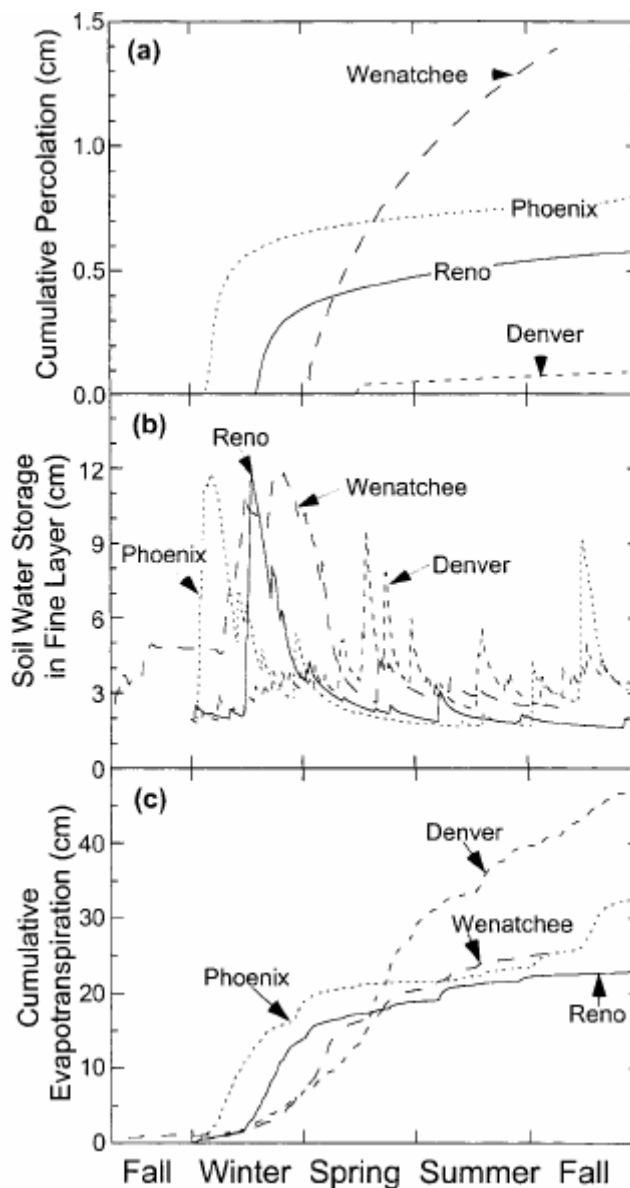
Impactos del Espesor de la Capa de la Base (de Grano Grueso) en la Infiltración del Agua a través de las Coberturas (Khire et al. 2000).

Se evaluó la filtración del agua a través de la cobertura SR sujeta a las cuatro condiciones climáticas diferentes; los resultados se presentan en la Figura 3-8. Esta figura muestra que la filtración no está directamente relacionada con la cantidad anual de precipitación, por ejemplo, el clima de Denver tiene la mayor precipitación anual (49,2 cm) pero la cobertura SR transmite la filtración mínima (0,1 cm). Por el contrario, la cobertura SR de Wanatchee recibió una cantidad intermedia de precipitación anual (27,2 cm), pero transmitió la mayor filtración (1,4 cm). Las diferencias en la filtración acumulada entre los cuatro escenarios se pueden explicar al examinar el almacenamiento de agua del suelo en la capa de retención de humedad. En tres de los casos estudiados (Wenatchee, Phoenix y Reno) las precipitaciones son más frecuentes durante el otoño y a principios del invierno, donde la evapotranspiración suele ser menor debido a la menor radiación solar, temperaturas del aire más bajas y vegetación inactiva. El agua en este periodo se acumula en la capa de retención de humedad (el almacenamiento de agua del suelo se incrementa) y ocasionalmente el almacenamiento de agua del suelo excede la capacidad total de almacenamiento de agua de la cobertura (estimada en aproximadamente 11 cm en esta cobertura SR) lo cual origina la filtración a través de la capa de grano grueso de la base. Por lo contrario, las condiciones climáticas de Denver se caracterizan por precipitaciones frecuentes durante periodos donde la radiación solar y la temperatura del aire son relativamente altas y la vegetación es activa. En consecuencia, la mayor parte del agua se evacua rápidamente mediante la escorrentía y la evapotranspiración, lo cual limita la filtración a través de la cobertura SR.

Estos resultados indican que las condiciones meteorológicas críticas para una cobertura SR dependen del sitio y no sólo están en función de la precipitación anual sino también de su distribución en tiempo e intensidad. Las condiciones más críticas se producen cuando las precipitaciones son frecuentes y cuando la evapotranspiración es baja. La nevada que podría acumularse en la cobertura y derretirse posteriormente puede originar condiciones críticas. Finalmente, se deben identificar las condiciones extremas que se pueden producir en un periodo corto y se debe evaluar la capacidad de la cobertura para hacer frente a estas condiciones.

Coberturas de Almacenamiento

Figura 3-8 Impactos de las Condiciones Climáticas en la Infiltración del Agua a través de las Coberturas



3.2 Cobertura SDR

Una barrera capilar con declive aprovecha las propiedades no saturadas de los suelos para favorecer el drenaje lateral durante los periodos lluviosos, un proceso que complementa la función de evaporación asociada con el flujo de agua ascendente durante los periodos secos. Dichos sistemas inclinados (denominados coberturas SDR) han demostrado que funcionan bien como un medio para desviar el agua en climas relativamente secos (por ejemplo, Ross 1990; Stormont, 1996; Zhan et al. 2001).

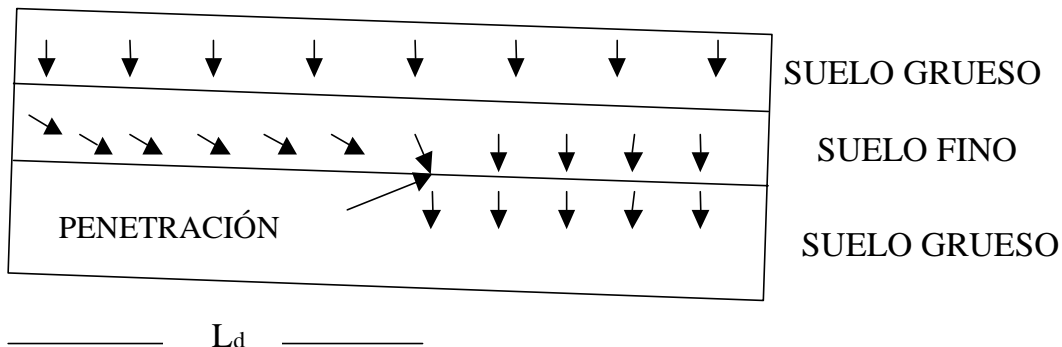
3.2.1 Efecto de la pendiente

Un aspecto particular del comportamiento de la barrera capilar inclinada es que la humedad no se distribuye equitativamente a lo largo de la longitud de la pendiente; en

Coberturas de Almacenamiento

las elevaciones más bajas del sistema de cobertura se suele observar un mayor contenido de agua. Cuando existe un aporte significativo de agua, ésta se acumula sobre la interfaz hasta que la presión negativa local alcanza el valor de la entrada del agua (ψ_w) (o presión de la entrada del agua) del material grueso. El valor ψ_w corresponde, en la curva de retención de agua (WRC), a la succión (ψ) en la cual el agua empieza a penetrar el material en una ruta húmeda (provocando un aumento del contenido de agua). En este punto (donde la presión en la interfaz es igual al ψ_w del suelo de grano grueso), la infiltración del agua en el material grueso se vuelve significativo y el efecto de la barrera capilar desaparece progresivamente. La ubicación de este “punto” a lo largo de la pendiente (que en realidad es una zona, según se analiza más adelante) se denomina Límite Pendiente Abajo o Punto (Down Dip Limit - DDL) (Ross, 1990). La cantidad de agua que fluye lateralmente hasta el punto DDL (véase el punto de penetración en la Figura 3-9) se denomina capacidad de desviación de la barrera capilar (Ross 1990; Steenhuis et al. 1991; Stormont 1995). La distancia entre la parte más alta de la pendiente y el punto DDL se denomina longitud efectiva de la barrera capilar (L_d).

Figura 3-9 Esquema de una Cobertura de Capas



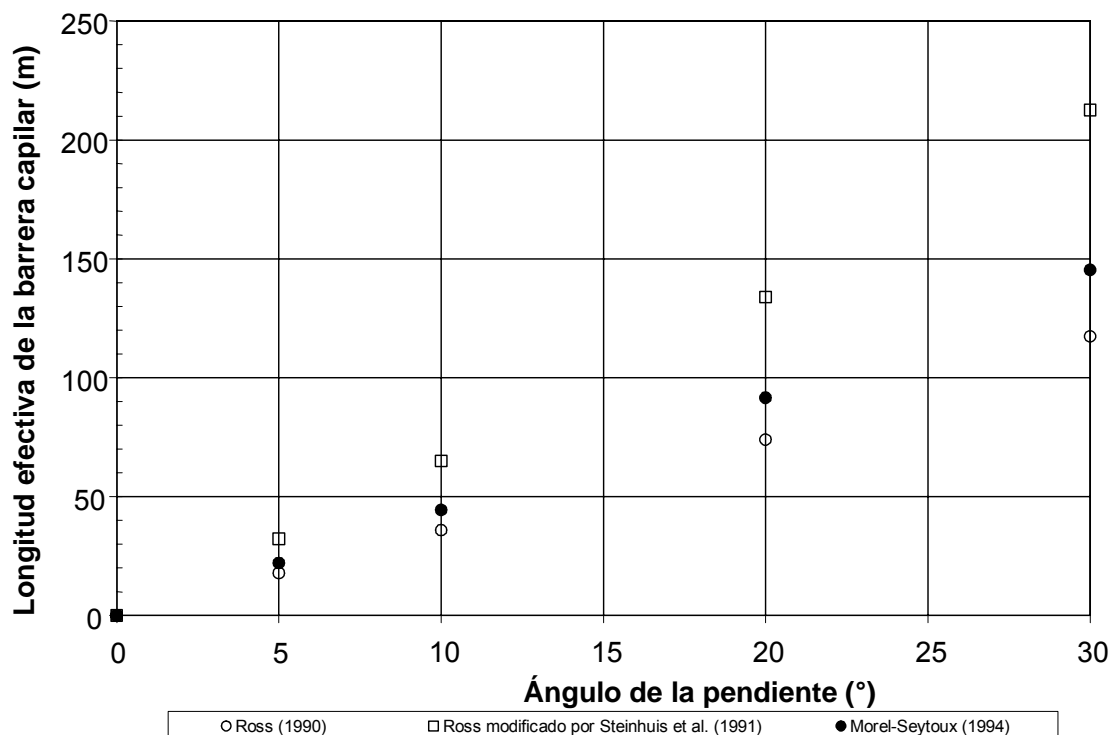
Muestra el movimiento del agua en una CCBE inclinada después de un evento de precipitación; el agua penetra a través del suelo de grano grueso cuando la succión alcanza su WEV (valor de la entrada del agua) (adaptado de Bussi re, 1999).

Una vez que el agua se mueve por la interfaz incrementa el grado de saturaci3n y la conductividad hidráulica del material grueso, disipando por consiguiente el efecto de la barrera capilar. Las condiciones climáticas tienen una funci3n muy importante en el comportamiento de la cobertura. Según la intensidad y la duraci3n de las precipitaciones esperadas, el sistema de cobertura podría tener que manejar grandes cantidades de agua que pueden superar su capacidad de desviaci3n (Apithy 2003, Bussi re et al. 2003a). Además, la histéresis de las funciones hidráulicas puede cumplir una funci3n en el comportamiento hidráulico de la cobertura SDR; este aspecto no será considerado en este documento.

Se han propuesto algunas soluciones analíticas para evaluar la capacidad de desviaci3n y la longitud de las barreras capilares con declive que serían ideales (véase la Tabla 3-1). Estas soluciones han sido desarrolladas típicamente para condiciones continuas, con una presi3n (o succi3n) que no depende de la ubicaci3n en la pendiente (excepto para la soluci3n Morel-Seytoux). Además, ellas suelen considerar que la capa de material de grano grueso será infinitamente gruesa, y que la superficie freática estará lejos de la interfaz. Algunas de estas soluciones analíticas han sido estudiadas y comparadas (e.g., Bussi re et al. 1998; Bussi re 1999). La Figura 3-10 muestra un ejemplo de la influencia del ángulo de la pendiente en la longitud efectiva de la barrera capilar (L_d) utilizando algunas de estas soluciones analíticas te3ricas. En

este caso, la cobertura está hecha de suelo limonítico (conductividad hidráulica saturada (k_{sat}) = 3×10^{-7} m/s, $\psi_a \approx 50$ kPa) colocada sobre arena ($k_{sat} = 2,5 \times 10^{-4}$ m/s, $\psi_a \approx 4$ kPa), ambos espesores se consideran infinitos y la tasa de precipitación aplicada a la parte más alta equivale a 10 cm/día. Los resultados muestran que la capacidad de desviación de una barrera capilar inclinada se incrementa considerablemente con el ángulo de la pendiente. En este caso en particular, es posible tener un valor L_d sobre 70 m con un ángulo de pendiente de 20° (más detalles en Bussiére 1999).

Figura 3-10 Ejemplo de la Influencia del Ángulo de la Pendiente en la Longitud Efectiva de la Barrera Capilar



Ejemplo de la influencia del ángulo de la pendiente en la longitud efectiva de la barrera capilar (calculada con tres soluciones analíticas; los detalles se presentan en la sección 3.3.3) hecha de material limonítico sobre un suelo arenoso, para una tasa de precipitación de 10 cm/día (adaptado de Bussiére, 1999)

Coberturas de Almacenamiento

Tabla 3-1 Expresiones Matemáticas de las Soluciones Analíticas para una Barrera Capilar Homogénea Inclinada

Ross (1990)

$$Q_{dm} = k_{sat2} \frac{\tan \alpha}{a_{s2}} \left[\left(\frac{P}{k_{sat1}} \right)^{a_{s2}/a_{s1}} - \frac{P}{k_{sat2}} \right] \quad (3.1)$$

α : ángulo de la pendiente
 k_{sat} : conductividad hidráulica saturada (m/s)
 a_s : número de sorción relacionado con la distribución del tamaño del poro (Philip, 1969)
 P : flujo de agua vertical (m/s)

Ross (1990) modificado por Steenhuis et al. (1991)

$$Q_{dm} = k_{sat2} \tan \alpha \left[a_{s2}^{-1} \left(1 - \frac{P}{k_{sat2}} \right) + \psi_{a2} - \psi_w \right] \quad \psi_{a2} \geq \psi_w \quad (3.2)$$

ψ_a : presión de la entrada del aire (algunas veces llamado valor de la entrada del aire) (m de agua)
 ψ_w : presión de la entrada del agua del material grueso (m de agua)

Morel-Seytoux (1994)

$$Q_{dm} = k_{sat2} \tan \alpha \left[\psi_{c2} - \psi_{aM1} \left(\frac{q^* P}{k_{sat1}} \right)^{\frac{M1}{p1}} \right] \quad (3.3)$$

ψ_c : presión capilar efectiva (Morel-Seytoux y Khanji, 1974) (m de agua)
 ψ_{aM} : presión de entrada del aire de la curva de humedecimiento (m de agua)
 q : fracción transmitida (1 en el punto DDL)
 M : Brooks y Corey (1964) parámetro utilizado para describir la curva de retención de agua (Morel-Seytoux et al. 1996)
 p : Brooks y Corey (1964) parámetro usado para describir la función de permeabilidad. p se calcula de la relación propuesta por Corey (1977): $p=3+2M$ (Morel-Seytoux et al. 1996)

NOTA: Los índices 1 y 2 en las ecuaciones se refieren al material grueso y fino, respectivamente.

3.2.2 Modelamiento Numérico

Las soluciones analíticas existentes proporcionan una estimación preliminar de la ubicación del punto DDL, pero tienen una aplicabilidad limitada en la práctica debido a sus inherentes suposiciones simplificadoras. De ahí que se consideró necesario realizar mayores investigaciones para una mejor definición de la respuesta de la cobertura SDR inclinada. El modelamiento numérico es una herramienta conveniente para investigar el comportamiento del flujo no saturado de una barrera capilar (Oldenburg y Pruess 1993; Bussi re et al. 1995, 2000, 2003a, 2003b; Aubertin et al. 1997a, 1997b, 1999; Zhan et al. 2001). Mediante un trabajo previo se ha demostrado que es posible pronosticar el movimiento del agua y la distribución en las coberturas con barrera capilar inclinadas u horizontales por medio de códigos numéricos saturados – no saturados comúnmente disponibles (por ejemplo, Bussi re et al. 2003a). Esta sección presenta algunos resultados de una serie de análisis numéricos, inspirados en casos t picos de campo encontrados en sitios de mina; dichos análisis fueron desarrollados para investigar el efecto de parámetros diferentes (para una inclinación de pendiente dada) en el desempeño de la cobertura con barrera capilar inclinada (SDR) utilizada para limitar la infiltración de agua. El caso base comprendió el uso de una cobertura, hecha de suelo limonítico, instalada en una pila de desmonte (e.g., Zhan et al. 2001). El primer objetivo del estudio fue observar la respuesta a corto plazo de la cobertura después de grandes tormentas, para diferentes tasas de precipitación, propiedades del material y configuraciones de cobertura.

El programa principal utilizado para estos c culos es el modelo de elemento finito comercial *SEEP/W* (que no toma en cuenta la evapotranspiración ni la escorrentía)

Coberturas de Almacenamiento

desarrollado por *GEO-SLOPE International Ltd.* (2006). El primer modelo representa un botadero de desmante circular cubierto (en condiciones axisimétricas) de una altura de 24,5 m, un radio de base de 50 m y un ángulo de la pendiente de 40° (Apithy 2003). La densidad de la malla, la cual contiene más de 3200 elementos, es más importante en la cobertura que en el desmante para tener una exactitud máxima en la cobertura (véase la Figura 3-11). Este modelo contiene 3 materiales diferentes: un desmante homogéneo, que tiene las propiedades de la grava; un material de cobertura limonítica delgada; y una capa de material de drenaje/escorrentía de 6 cm. La última es una capa “virtual” que fue utilizada para la acumulación y el movimiento del agua en la superficie de la cobertura (como escorrentía), pero puede no existir en realidad. En este caso en particular, la cobertura está hecha sólo de un material, ya que el desmante puede crear el efecto de barrera capilar necesario en la interfaz con el suelo limonítico (Zhan et al. 2001). Se simuló un drenaje inferior mediante la aplicación de una presión de límite igual a la presión atmosférica en la base de la pendiente (en la cobertura a $x = 55$ m y $z = 0,5$ m). La napa freática se colocó en la base de la rejilla ($z = 0,5$ m). La carga de presión inicial en cada nodo, necesaria para los cálculos transitorios, se obtuvo de un análisis continuo que utilizó el mismo modelo; en el caso de las simulaciones continuas, se aplicó una tasa de precipitación (P) de 1 mm/día en la parte más alta de la cobertura. Durante los análisis transitorios, la condición del límite P aplicada en la parte más alta del modelo osciló entre 0,5 y 30 cm/día.

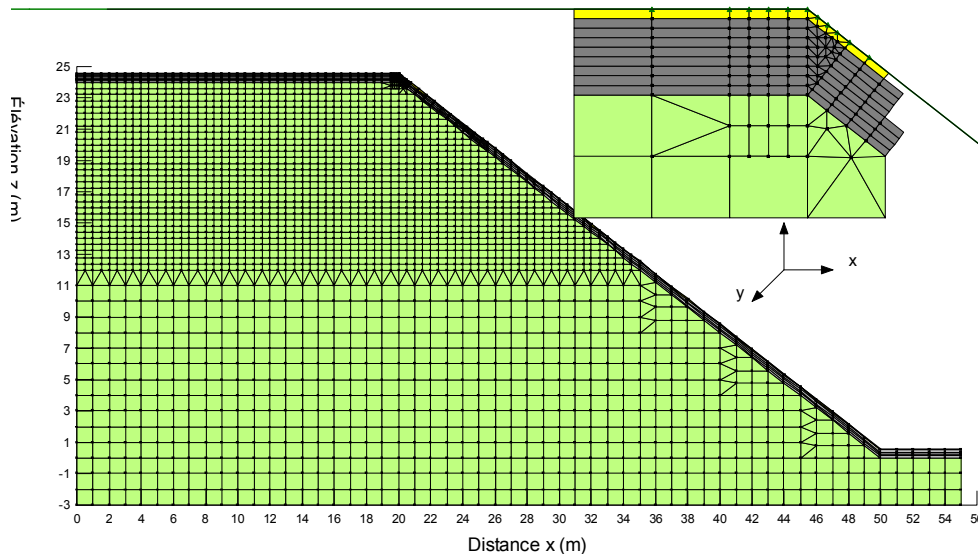
Las principales propiedades hidráulicas de los diferentes materiales utilizados en esta investigación numérica se muestran en la Tabla 3-2. El desmante tiene un valor de entrada del aire nulo y una conductividad hidráulica saturada (k_{sat}) de 10^{-0} cm/s. El material de la superficie tiene un valor de entrada del aire bajo (ψ_a) de aproximadamente 0,5 m de agua y una conductividad hidráulica saturada k_{sat} de 10^{-3} cm/s. Los contenidos volumétricos de agua residual y saturada, θ_r y θ_s de este material son 0,06 (para un ψ_w de 85 kPa, o alrededor de 8,5 m de agua) y 0,39, respectivamente. Se utilizaron cuatro diferentes propiedades de material limonítico, donde la principal diferencia se encuentra en su conductividad hidráulica saturada (véase la Tabla 3-2). Esta k_{sat} varía entre 10^{-3} a 10^{-6} cm/s (Apithy 2003). Para cada tasa de precipitación se investigó la respuesta de cuatro coberturas con diferentes valores k_{sat} . Finalmente se estudiaron dos espesores de cobertura: 25 y 50 cm para tasas de precipitación de 10 y 20 cm/día y para un material de cobertura con una k_{sat} de 10^{-6} m/s. El énfasis en este estudio está en la ubicación (denominada z_{85}) del punto DDL en la pendiente, donde los efectos de la barrera capilar comienzan a desaparecer.

Tabla 3-2 Principales Propiedades Hidráulicas de los Materiales

Material	ψ_a (m de agua)	θ_s (o n)	k_{sat} (cm/s)	θ_r	ψ_w (m de agua)
Superficie	0,5	0,39	1×10^{-3}	0,06	8,5
Limo A	1,5	0,38	1×10^{-3}	0,06	10,0
Limo B	1,5	0,38	1×10^{-4}	0,06	10,0
Limo C	1,5	0,38	1×10^{-5}	0,06	10,0
Limo D	1,5	0,38	1×10^{-6}	0,06	10,0
Desmante	≈ 0	0,3	1×10^{-0}	0,005	<1

Principales propiedades hidráulicas de los materiales utilizados en los cálculos numéricos realizados con el modelo mostrado en la Figura 3-11 (Apithy, 2003).

Figura 3-11 Malla Típica Utilizada en los Cálculos de Flujo No Saturado



Malla Típica Utilizada en los Cálculos de Flujo No Saturado, con una vista en primer plano de la parte más alta de la pendiente (adaptado de Apithy 2003); las propiedades de la capa de la superficie (arriba), la capa de limo (oscuro) y el desmante en la pila se proporcionan en la Tabla 3-1.

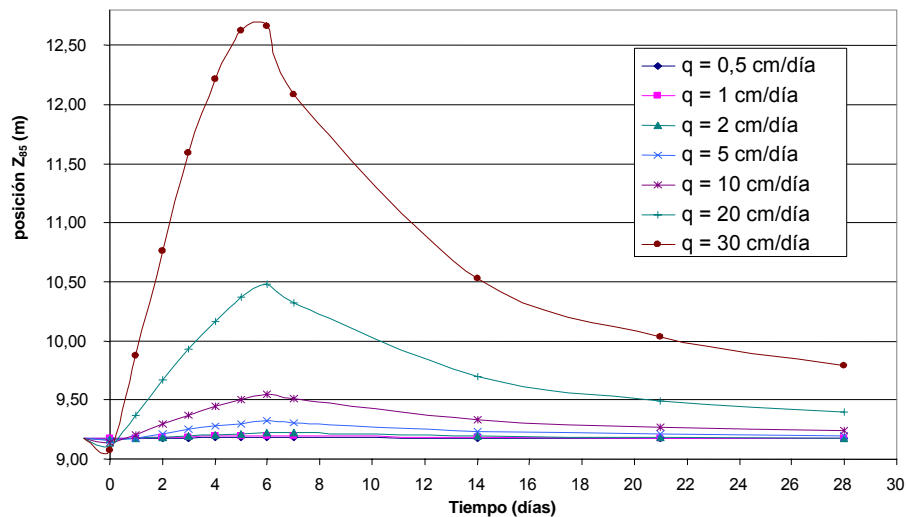
3.2.3 Efecto de la tasa de precipitación

En términos generales, se desarrollaron más de 30 simulaciones diferentes utilizando diferentes tasas de precipitación: 0,5, 1, 2, 5, 10, 20 y 30 cm/día. Según se mencionó anteriormente, estas precipitaciones se aplicaron durante 5 días y se dejó que el sistema drene durante 23 días. La ubicación del DDL corresponde al punto donde la presión cerca a la interfaz equivale al valor de la entrada del agua del material grueso (es decir, ψ_w de 8,5 m de agua o 85 kPa; véase la Tabla 3-2). Aquí se debe señalar que este gran ψ_w se identificó de manera conservadora en la curva de retención de agua del desmante; un valor más alto significa que existe una mayor posibilidad para que la succión se vuelva menor que el ψ_w , dando por consiguiente una visión “pesimista” de la ubicación del DDL y del desempeño de la cobertura. Por lo tanto, la longitud de la desviación dada aquí debe tomarse como límites menores para problemas inmediatos. Se pueden encontrar mayores detalles sobre estos y otros resultados en Apithy (2003).

En la Figura 3-12 se muestra el efecto de la tasa de precipitación en la ubicación del punto DDL, expresado aquí como elevación z_{85} , para una cobertura con un espesor de 50 cm. Para estas simulaciones, el material de cobertura fue Limo A. Para las condiciones del límite aplicadas al modelo, el valor z_{85} varió de 9 a 12,7 m desde la base de la pila. Los resultados indican que existe un valor crítico de P sobre el cual el punto DDL comienza a moverse desde su posición inicial ($z = 9$ m) hacia la parte más alta de la pendiente. En esta serie de cálculos, el valor crítico P estuvo entre 2 y 5 cm/día. Para una precipitación menor que este valor crítico P, la cobertura puede desviar el agua a lo largo de la pendiente, hasta la longitud máxima determinada por la posición de la napa freática y por las propiedades del material. Para tasas de precipitación mayores, el agua empieza a infiltrarse significativamente bajo la cobertura en el punto DDL (o muy cerca). Se observó que la longitud de la desviación tiende a disminuir a medida que se incrementa P. Para valores P relativamente grandes (es decir, sobre 5 cm/día, aproximadamente), el sistema no alcanza una

condición continua después de 5 días de precipitaciones; la longitud de la desviación sigue disminuyendo a medida que el punto DDL continúa moviéndose hacia arriba.

Figura 3-12 Evolución de la Posición z_{85} (m) del Punto DDL (z_{85}) en la Precipitación



Evolución de la Posición z_{85} (m) del Punto DDL (z_{85}) durante las simulaciones de 28 días (5 días de precipitación seguido de 23 días de drenaje) para diferentes tasas de precipitación; un incremento de z_{85} corresponde a una longitud de desviación más corta de la CCBE (adaptado de Apithy, 2003).

3.2.4 Efecto de la conductividad hidráulica saturada

Mediante otra serie de simulaciones se intentó evaluar la influencia de la conductividad hidráulica saturada del material de cobertura (k_{sat}) sobre su capacidad de limitar la infiltración del agua. Se utilizaron cuatro diferentes valores k_{sat} de material de cobertura: 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} y 10^{-8} m/s. La Figura 3-13 muestra la ubicación del punto DDL (z_{85}) para diferentes precipitaciones acumuladas en la cobertura después de 5 días (expresado en cm de agua) y utilizando una tasa de precipitación de 10 cm/día. Para esta P (10 cm/día), la cantidad acumulada de agua después de 5 días es de 50 cm. Los resultados muestran que para los materiales que tienen una k_{sat} menor o igual a 10^{-7} m/s, el z_{85} no parece variar con P (el DDL permanece en su posición inicial). Sin embargo, el punto DDL se ve afectado cuando el material de cobertura tiene una conductividad hidráulica mayor de 10^{-7} m/s, especialmente cuando la precipitación acumulada es muy grande (mayor de 50 cm). Estos resultados muestran la importancia de la k_{sat} en la capacidad de desviación de este tipo de CCBE (cobertura con efectos de barrera capilar, por sus siglas en inglés) inclinada.

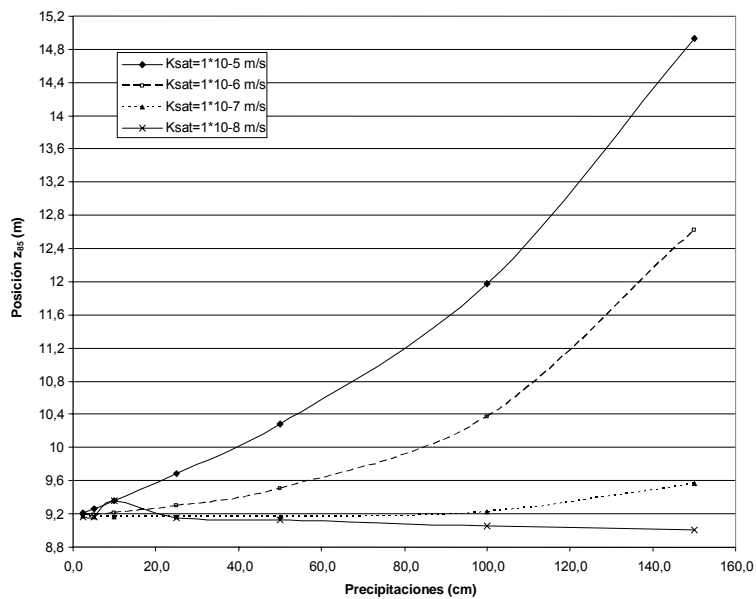
3.2.5 Efecto del espesor de la cobertura

Se desarrollaron simulaciones numéricas en dos coberturas con diferente espesor: 25 y 50 cm. Para estas simulaciones, se aplicaron dos valores de P (de 10 y 20 cm/día) como condiciones del límite; se utilizó una k_{sat} de 10^{-6} m/s para el material de cobertura. En la Figura 3-14 se muestra la ubicación del punto DDL (z_{85}) versus tiempo para las condiciones estudiadas. Para un valor P de 10 cm/día, las ubicaciones z_{85} están alrededor de 10,2 m y 9,6 m para un espesor de cobertura de 25 y 50 cm, respectivamente. Cuando la tasa de precipitación se incrementa a 20 cm/día, el z_{85} se

Coberturas de Almacenamiento

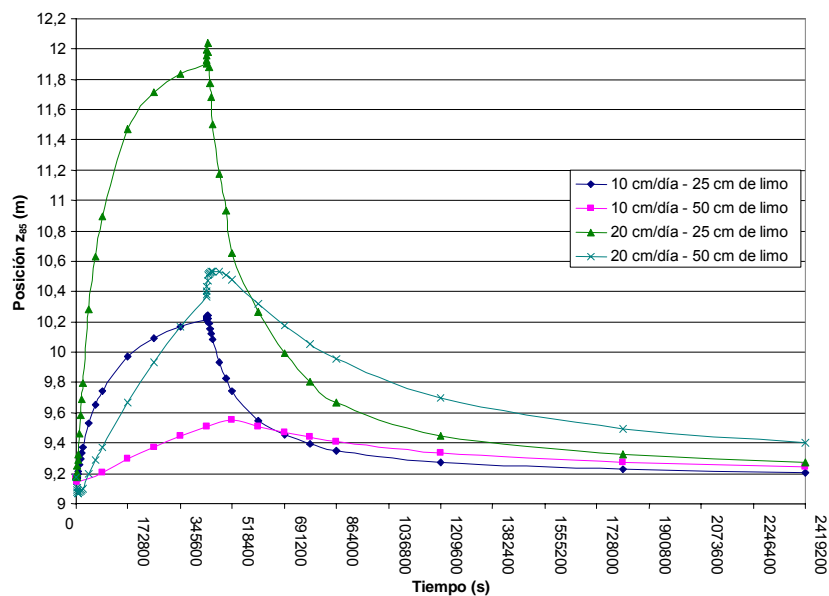
mueve a una elevación de 12 y 10,5 para un espesor de 25 y 50 cm, respectivamente. Se puede ver que los valores más altos de z_{85} se obtienen para valores más altos de P y espesores menores de cobertura; esto significa que un incremento en el espesor de la cobertura puede ayudar a reducir la infiltración del agua al incrementar la longitud de la barrera capilar.

Figura 3-13 Ubicación del Punto DDL (z_{85}) después de las Precipitaciones



Ubicación del punto DDL (z_{85}) después de 5 días de precipitaciones (precipitación acumulada en cm) para diferentes materiales de cobertura con diferentes k_{sat} ; un incremento de z_{85} corresponde a una longitud más corta de la barrera capilar.

Figura 3-14 Evolución de la Ubicación del Punto DDL (z_{85}) durante la Precipitación



Evolución de la ubicación del punto DDL (z_{85}) durante los 28 días de modelamiento para tasas de precipitación de 10 y 20 cm/día y para espesores de cobertura de 25 y 50 cm.

3.3 Metodología para el diseño

En las secciones anteriores se mostraron los factores principales que afectan el desempeño de las coberturas SR y SDR para limitar la infiltración del agua. A continuación se propone una metodología para el diseño de un sistema de cobertura eficiente.

La metodología se puede subdividir en 7 pasos:

1. Caracterización de los materiales de la cobertura
2. Recolección de información climática y acerca de la vegetación
3. Evaluación preliminar de las capas de la cobertura
4. Modelamiento numérico del flujo no saturado
5. Modelamiento físico
6. Diseño final
7. Construcción y monitoreo a largo plazo

En la Figura 3-15 A se muestra un diagrama de bloques que representa los diferentes pasos que conducen a la implementación de una cobertura SDR.

3.3.1 Caracterización de los materiales de la cobertura – Paso 1

Como se vio anteriormente, las propiedades de los materiales de la cobertura tendrán un impacto directo en la capacidad de la cobertura para actuar como una barrera contra infiltraciones. Las propiedades que deben evaluarse en cada material son la distribución del tamaño del grano, la densidad relativa de los granos (D_r), los límites de Atterberg (si fuera pertinente), las propiedades de compactación, la conductividad hidráulica saturada (k_{sat}) y las propiedades no saturadas (curva de retención de agua y conductividad hidráulica no saturada). Para los primeros cinco parámetros existen métodos estándar (ASTM D422-63, ASTM D854-58, ASTM D4318-84, D1557-78, ASTM D5856, respectivamente). En esta fase de construcción resultan especialmente importantes la distribución del tamaño de grano, la densidad relativa de los granos, los límites de Atterberg y las propiedades de compactación; estos parámetros se suelen utilizar para el control de calidad. Las propiedades no saturadas también son fundamentales para el diseño de una cobertura SR o SDR, que incluyen el modelamiento del flujo no saturado. Se puede evaluar la curva de retención del agua (WRC) de los suelos mediante diferentes enfoques, tales como el aparato de placa de presión (que se adaptan bien en suelos que tienen un valor de la entrada del aire mayor de 50 cm de agua) y columnas con instrumentos (muy apropiados para suelos de grano grueso). También pueden utilizarse otras técnicas (mencionadas en el Capítulo 2). Las funciones de permeabilidad (k_u) se suelen estimar mediante métodos teóricos, tales como los presentados en el Capítulo 2 (e.g., Mualem 1976; Fredlund et al. 1994).

3.3.2 Recolección de información climática y acerca de la vegetación – Paso 2

Como se vio en las secciones anteriores de este Capítulo, la información climática tiene un impacto significativo en el desempeño de una cobertura SDR. En la etapa de diseño, es esencial recolectar información climática típica del sitio. La información necesaria comprende la temperatura, velocidad y dirección del viento, radiación solar, humedad del aire y precipitación. Esta información puede ser utilizada posteriormente para estimar la tasa de evapotranspiración mediante enfoques indirectos (véase el Capítulo 2) y como información de entrada en los modelos numéricos. Si existen

medidas directas de la evapotranspiración disponibles mediante el uso de un lisímetro o un micro-lisímetro, éstas pueden ser utilizadas directamente en el código numérico con la precipitación. Se debe identificar un año lluvioso típico para hacer una evaluación del desempeño a largo plazo; también es importante evaluar la respuesta a corto plazo de la cobertura después de tormentas mayores. Estos eventos extremos pueden ser vistos como tres tormentas consecutivas de 24 horas con un periodo de retorno de 100 años (e.g., Zhan et al. 2001).

La absorción de agua por parte de las raíces y la transpiración de la vegetación constituyen también componentes importantes del equilibrio hídrico de la cobertura. La evapotranspiración estimada por softwares numéricos y de acuerdo con fórmulas diferentes tales como Penman (1948), Thornthwaite (1961) y Turc (1972) (para nombrar sólo algunas) suele ser una función de parámetros diferentes tales como densidad y profundidad de las raíces, porcentaje de área descubierta, temporada de cultivo e índice de área foliar (LAI) (e.g., Fayer y Jones 1990; Khire et al. 1999, 2000; Dwyer 2003). Estos parámetros deben ser estimados o medidos antes del análisis numérico (si existe vegetación en la cobertura).

3.3.3 Evaluación preliminar del espesor de la cobertura – Paso 3

Se puede hacer un estimado del espesor necesario de la capa de grano fino según la profundidad requerida del agua que será almacenada en el suelo y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Se puede llevar a cabo una evaluación preliminar del espesor de la capa de grano fino (para condiciones unidimensionales) mediante un enfoque inicialmente propuesto por Stormont y Morris (1998) y modificado posteriormente por Khire et al. (2000). Este enfoque consiste en estimar la capacidad de almacenamiento (S_{Fc}) de la capa de retención de humedad, asumiendo que existe una gradiente de succión unitaria en la capa justo antes de la llegada del flujo a la capa de grano grueso. La estrategia de diseño para la cobertura SR y SDR es garantizar que S_{Fc} sea suficiente para almacenar la cantidad de infiltración en condiciones extremas hasta que el agua almacenada sea retirada mediante evapotranspiración. Un componente adicional se integra en la ecuación cuando existe vegetación presente en la capa de grano fino. Aquí se asume que la vegetación retirará toda el agua disponible de una cobertura en cada temporada de cultivo (Khire et al. 1997, 1999; Ward y Gee 1997). Se asume que el contenido de agua residual en estas condiciones es la única en el punto de sequedad (θ_{wp}), el cual se asume comúnmente para una succión de 15 000 cm de agua (Hillel 1980). La capacidad de almacenamiento de la capa de retención de humedad (de grano fino) se puede expresar de la siguiente manera (Khire et al. 2000):

$$S_{Fc} = \int_0^L \theta(z + \psi_B) dz - \theta_{wp} L \quad (3.4)$$

donde L es el espesor de la capa de retención de humedad, z es la distancia sobre la interfaz fino-grueso, ψ_w es la presión de la entrada del agua y θ_{wp} es el punto de sequedad.

El espesor requerido de la capa de retención de humedad L_R es el valor de L necesario para tener una capacidad de almacenamiento que pueda hacer frente a las condiciones críticas. Esta ecuación significa que el espesor requerido de la capa de retención de humedad (L_R) es una función de la WRC de ambos materiales y con el contenido volumétrico de agua en el punto de sequedad. Una cobertura SR eficiente estaría hecha de una capa de base de grano grueso con un ψ_w bajo, cobertura por una

capa de retención de humedad que no ha empezado a desaturar en el equilibrio (incluso a $z=L_R$) y con un θ_{wp} bajo.

Cuando un sistema de cobertura se construye en la pendiente de un área de disposición de residuos de la mina se puede producir infiltración de agua en el material de grano grueso en el punto DDL, y el efecto de la barrera capilar puede desaparecer progresivamente. Para evitar una penetración significativa, la longitud de la pendiente del sistema de cobertura debe ser menor que la longitud de la desviación. En las etapas preliminares del proyecto es necesario evaluar el punto DDL, para lo cual se utilizan ecuaciones analíticas mostradas en la Tabla 3-1.

3.3.4 Modelamiento numérico del flujo no saturado – Paso 4

La ecuación 3.1 y las ecuaciones presentadas en la Tabla 3-2 proporcionan información preliminar para el diseño de una cobertura SR o SDR. El siguiente paso en estas condiciones consiste en perfeccionar la configuración de la cobertura mediante el modelamiento numérico. Las propiedades del suelo no saturado evaluadas en el laboratorio (para valores de porosidad similares a los esperados en el campo) se integran a los modelos numéricos, así como las condiciones climáticas críticas (condiciones a corto y largo plazo) y la información acerca de la vegetación. Se debe realizar un estudio numérico paramétrico para optimizar el espesor de las capas. Se debe evaluar la variabilidad de las propiedades del suelo y se deben utilizar las propiedades del peor caso en la etapa de diseño. Es posible utilizar diferentes códigos numéricos para las coberturas SR; los códigos más conocidos que pueden simular el flujo no saturado y las interacciones suelo-atmósfera son *UNSAT-H* (Fayer y Jones 1990), *SoilCover* (Unsaturated Soil Group 1997), *Vadose/W* (Geoslope International 2006) y *SVFlux* (SoilVision Systems Ltd. 2005). Cuando el sistema de cobertura es inclinado, se deben realizar análisis numéricos similares (independientes), pero en dos dimensiones. En el diseño de una cobertura SDR, es crucial analizar por separado las porciones planas e inclinadas de un sitio, ya que su comportamiento hidráulico puede ser completamente diferente debido a los efectos geométricos.

Los resultados de los análisis numéricos se utilizan para identificar la configuración que permite alcanzar el desempeño planificado en cuanto a la infiltración del agua. La máxima infiltración aceptable de agua depende de los objetivos ambientales y de las regulaciones aplicables en el país. Usualmente, una infiltración de 0,1 y 1 cm/año es considerada aceptable para rellenos de residuos sólidos y peligrosos (Khire et al. 2000). Para una cobertura SDR inclinada, un objetivo adicional consiste en evitar la aparición del punto DDL en la cobertura con pendiente en condiciones extremas.

3.3.5 Modelamiento físico –Paso 5

Después de la primera serie de análisis numéricos, es importante validar los resultados numéricos utilizando condiciones controladas. Con este propósito, se pueden utilizar modelos físicos, tales como las columnas con instrumentos, para los sistemas de cobertura instalados en una superficie plana; en estas columnas se pueden estudiar diferentes variables, tales como la cantidad de precipitación y la distribución de la humedad y la presión en las capas. Las columnas se pueden colocar en el laboratorio o fuera de él para exponer las columnas a condiciones climáticas reales. La información obtenida de estos experimentos debe estar bien correlacionada con los resultados del modelamiento de flujo no saturado. En caso contrario, se debe realizar un análisis integral de los resultados físicos y numéricos para entender las

discrepancias entre ambos. También se puede utilizar un modelo físico de laboratorio para evaluar la longitud de la desviación de un sistema de cobertura SDR, con ángulos de pendiente y tasas de precipitación diferentes (por ejemplo, Bussièrre 1999; Bussièrre et al. 2003b; Kämpf et al., 2003; Tami et al., 2004). Se suelen estudiar diferentes variables en el sistema de capas, tales como la cantidad de precipitación, la distribución de la humedad y de la presión y el flujo de agua en la base del modelo. Sin embargo, estos modelos son más grandes que las columnas (con longitudes que varían entre 2,5 y 8 m) y se necesita una cantidad significativa de material para desarrollar las pruebas en una configuración de cobertura. Es por ello que los costos de realización de estas pruebas son más altos que las pruebas unidimensionales de columna. Estos modelos físicos de laboratorio son útiles para entender mejor los fenómenos involucrados y para validar las herramientas de modelamiento, pero no ofrecen necesariamente soluciones prácticas para aplicaciones de campo.

El modelamiento físico de las coberturas SR también puede ser desarrollado en el campo, en una escala intermedia. En efecto, se pueden construir diseños de prueba experimental (en una superficie plana o inclinada) para comparar diversos escenarios de cobertura y para identificar el comportamiento que tendrían los diversos sistemas de cobertura en condiciones reales (por ejemplo, Zhan et al. 2001; Albright et al. 2004). Nuevamente, los resultados de estos diseños de prueba experimental se pueden utilizar para validar las herramientas numéricas y para perfeccionar la configuración final de la cobertura.

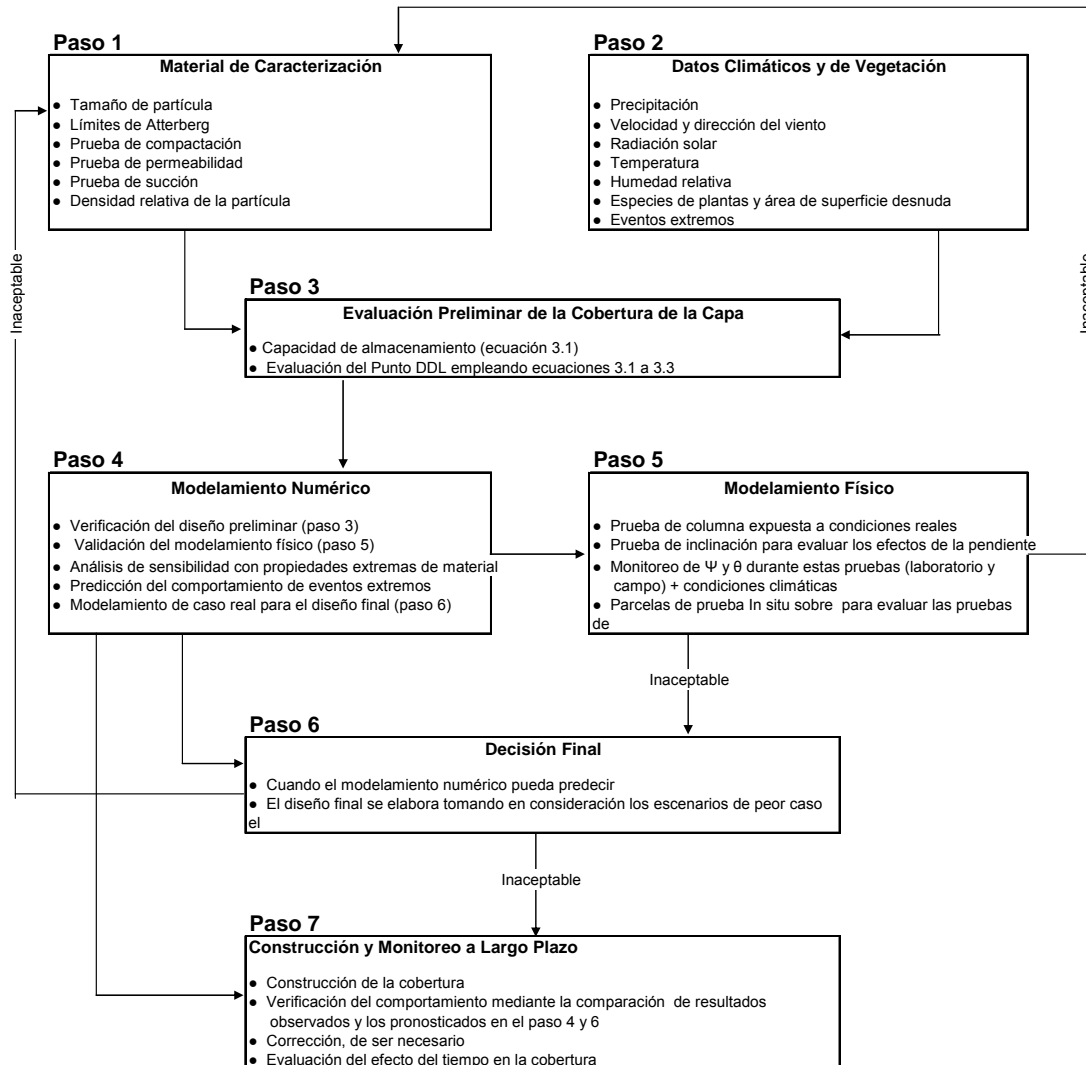
3.3.6 Diseño final, construcción y monitoreo a largo plazo - Pasos 6 y 7

Este paso final de diseño consiste en utilizar un modelo numérico que representa el caso real y pronosticar el comportamiento de la cobertura en condiciones normales y extremas. Cuando un diseño es satisfactorio, se puede construir la cobertura (Paso 7 en la Figura 3-15). Después de la etapa de construcción, la cobertura debe ser instrumentada y monitoreada, y se debe realizar una comparación entre los resultados pronosticados y medidos. Se evalúa el modelo numérico utilizado en la etapa de diseño y se realiza una recalibración del modelo si fuera necesario.

El monitoreo también permite identificar cualquier cambio significativo a largo plazo en cuanto a la eficacia de la cobertura para limitar la infiltración del agua. Se tendrán que tomar acciones en el sitio de la mina si el desempeño de la cobertura se ve afectado significativamente por el tiempo. Entre los factores más importantes que pueden afectar el desempeño de una cobertura SDR se encuentran la biointrusión, los efectos de congelación-descongelación, los efectos geométricos en la tasa de evaporación real, el agrietamiento por desecación y la erosión eólica y pluvial. Debido a que estos factores pueden tener un impacto en la capacidad de la cobertura para limitar la infiltración del agua, se debe añadir un factor de seguridad al diseño final de la cobertura. Sin embargo, no se proponen reglas claras en la bibliografía relacionada con el tema.

Coberturas de Almacenamiento

Figura 3-15 Diagrama para el Diseño de la Cobertura de Almacenamiento, Derivación y Descarga



3.4 Comentarios finales

Las secciones anteriores presentaron brevemente los conceptos principales detrás de las coberturas de Almacenamiento y Descarga (SR) y las coberturas de Almacenamiento, Desviación y Descarga (SDR). Se identificaron los principales factores de influencia y se propuso una metodología para diseñar coberturas SR o SDR eficientes. Para evaluar la calidad de una propuesta de diseño de SR o SDR, se deben incluir los siguientes puntos en el informe:

- la justificación del objetivo del diseño (tasa de filtración planificada) para el sistema de cobertura;
- las principales características hidrogeotécnicas de los materiales utilizados en el sistema de cobertura, para condiciones representativas;
- información climática (condiciones promedio y extremas) y acerca de la vegetación;
- una descripción del modelamiento físico (en el laboratorio y en el campo) utilizada para verificar el diseño y calibrar los modelos numéricos;

Coberturas de Almacenamiento

- los resultados principales del modelamiento físico;
- el efecto de la pendiente en el desempeño, si una porción de la cobertura está construida en una superficie inclinada;
- el diseño final basado en los resultados del modelamiento numérico (modelo previamente validado con los resultados del modelamiento físico) en condiciones extremas y en el peor escenario en cuanto a las propiedades del material;
- un análisis de otros aspectos que pueden afectar el desempeño a largo plazo del sistema de cobertura, tales como los ciclos de congelación-descongelación, desecación, vegetación, erosión pluvial y eólica y otros;
- una estrategia de monitoreo para verificar si se cumplen con los objetivos en cuanto a la filtración a través del sistema de cobertura.

4 COBERTURA CON EFECTOS DE BARRERA CAPILAR

4.1 Generalidades

Existen diferentes opciones de manejo y estrategias de rehabilitación disponibles para inhibir la producción de ácido en caso de residuos de mina que generan ácido. Para los climas húmedos, las barreras contra oxígeno constituyen la opción más viable (e.g., SRK 1989; MEND 2001). Con este propósito, es posible utilizar una cobertura de agua a fin de reducir la disponibilidad de oxígeno para los residuos de mina subyacentes que generan ácido (por ejemplo, Fraser y Robertson 1994; Amyot y Vézina 1997; Simms et al. 2001). También se puede crear una barrera contra oxígeno colocando una cobertura hecha de materiales que consumen oxígeno tales como residuos de madera, cobertura inerte de paja u otros residuos orgánicos (por ejemplo, Cabral et al. 2000; Tassé y Germain 2004). Otra forma efectiva de limitar la migración del oxígeno es mediante el uso de una cobertura con efectos de barrera capilar (CCBE) (e.g., Nicholson et al. 1989; Aubertin et al. 1995; Bussi re et al. 2003a).

Este tipo de barrera contra oxígeno se basa en un alto contenido de humedad en una (o más) de sus múltiples capas para evitar la migración del oxígeno (por ejemplo, Nicholson et al. 1989; Collin y Rasmusson 1990; Yanful 1993; Aachib et al. 1993; Ricard et al. 1997; Bussi re et al., 2003a, véase también el Capítulo 2). La difusión del gas a través de un medio poroso casi saturado (tal como un suelo de grano fino o relaves) puede ser lo suficientemente bajo para limitar la afluencia de oxígeno de la atmósfera hacia los residuos de mina sulfurosos, reduciendo por consiguiente la tasa de oxidación hasta un valor insignificante (por ejemplo, Nicholson et al., 1989; Rasmuson y Erikson, 1986; Aachib et al., 1993). En muchas situaciones, la CCBE está considerada como la opción más viable frente a otros tipos de barreras contra oxígeno para limitar la producción de drenaje ácido de mina.

En las siguientes secciones se presentan los principales factores que influyen en la cobertura con barrera contra oxígeno, seguido de una descripción de la metodología para el diseño de la cobertura.

4.2 Configuración Típica

En las coberturas se utiliza un fenómeno llamado efecto de la barrera capilar, el cual se ha descrito en el Capítulo 2, para mantener una de las capas cercana a la saturación completa de agua. Estos efectos de la barrera capilar se observan cuando se coloca un material de grano fino sobre uno más grueso encima de la napa freática. De ahí que el diseño de una CCBE utiliza el contraste hidráulico entre los suelos de grano grueso y fino para crear la barrera contra oxígeno.

Típicamente, la CCBE suele contener de tres a cinco capas, hechas de materiales diferentes; cada capa tiene una (o más) función(es) (véanse los detalles en la Tabla 4-1). Asimismo, en la Figura 4-1 se presenta el esquema de una CCBE de cinco capas colocada sobre residuos de mina que generan  cido. La capa de la base está hecha de un material de grano bastante grueso, el cual actúa como soporte mecánico y ruptura capilar. El material de grano fino, utilizado como placa de retención de humedad, se coloca sobre la primera capa para crear el efecto de barrera capilar. Este material debe tener una conductividad hidráulica saturada relativamente baja (k_{sat}) en comparación con la capa de ruptura capilar (es decir, k_{sat} 2 a 3 órdenes de

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

magnitud menores que el material que precede) y una capacidad significativa de retención de agua. Adicionalmente se coloca un material de grano grueso sobre la capa de retención de humedad para evitar la pérdida de agua por evaporación y promover el drenaje lateral. Las propiedades del material utilizado en esta capa suelen ser similares a los de la capa de la base. La finalidad de la capa de protección es proteger el núcleo del sistema de cobertura contra la erosión, biointrusión (raíces y/o animales enterrados), ciclos de lluvia-sequía y efectos de congelación-descongelación. Finalmente la capa de la superficie actúa como una capa de protección contra la erosión acuática y eólica y proporciona un medio de crecimiento para la vegetación (en caso de presencia de esta última).

Como un comentario final sobre la configuración de la cobertura, es importante mencionar que el número de capas puede variar según la situación; algunas capas pueden combinarse y cumplir más de una función.

Tabla 4-1 Principales Características de las Capas de la CCBE (Inspirado en Aubertin et al. 1995)

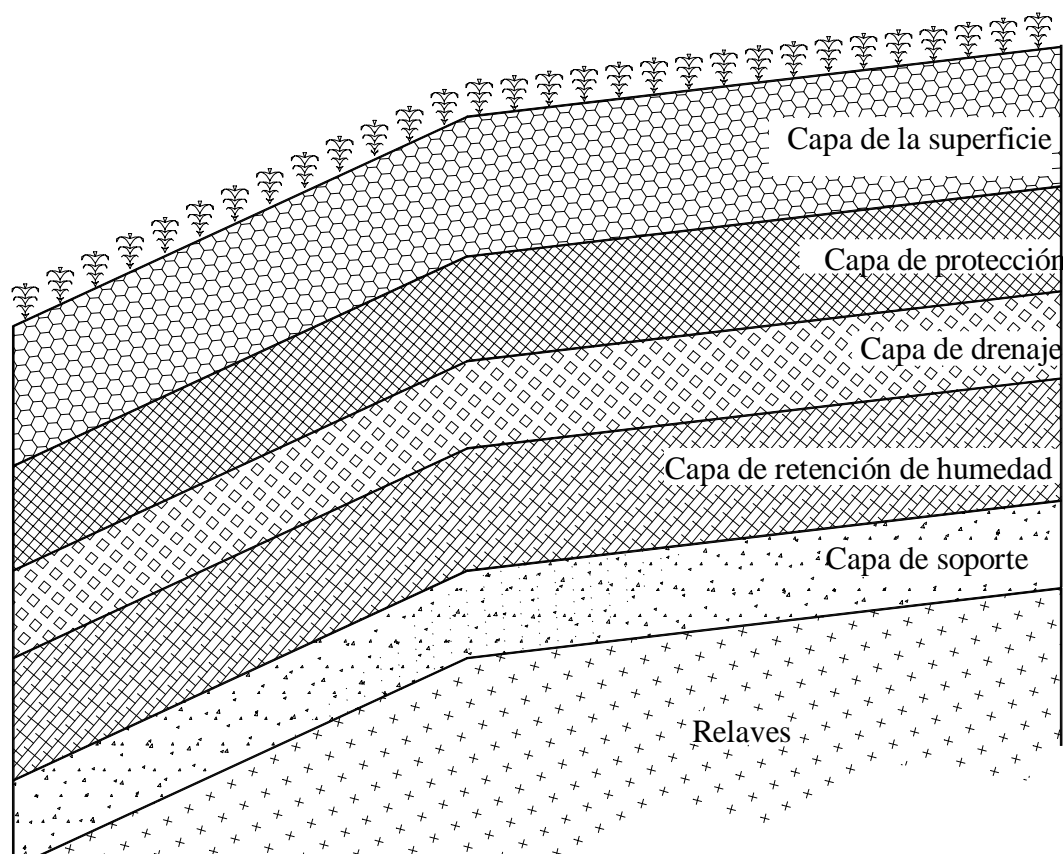
Capa (véase Figura 4-1)	Objetivos	Materiales típicos	k_{sat} típico	Espesor típico
Soporte	<ul style="list-style-type: none"> • Crear efectos de barrera capilar • Evitar el incremento capilar del DAM de los residuos de la mina • Capa de soporte para equipos pesados 	<ul style="list-style-type: none"> • Arena • Arena y grava 	$10^{-1} < k_{sat} < 10^{-3}$ cm/s	30 a 50 cm
Retención de humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Barrera contra oxígeno • Reducción de la infiltración del agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos limoníticos y arcillosos • Revestimiento geosintético de arcilla 	$k_{sat} < 10^{-5}$ cm/s	50 a 100 cm
Drenaje	<ul style="list-style-type: none"> • Crea efectos de barrera capilar • Reduce la acumulación de agua • Reduce la presión intersticial en la cobertura 	<ul style="list-style-type: none"> • Arena • Arena y grava 	$10^{-1} < k_{sat} < 10^{-3}$ cm/s	30 a 50 cm
Protección	<ul style="list-style-type: none"> • Barrera contra la biointrusión • Protege las capas subyacentes contra los efectos climáticos (ciclos de congelación - descongelación, desecación) • Almacenamiento temporal del agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Arena y grava con un alto porcentaje de cantos rodados (cuando la limitación de la biointrusión es crítica) 	$10^0 < k_{sat} < 10^{-4}$ cm/s	< 1m
Superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Zona de transición entre la cobertura y la naturaleza • Reduce la fluctuación de T° y la humedad y también la erosión • Crea las condiciones adecuadas para la vegetación • Minimiza la erosión 	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos orgánicos • También puede contener componentes geosintéticos (por ejemplo, Geogrid) 	---	15 a 20 cm

4.3 Principales Factores de Influencia – Análisis Numérico Unidimensional

Para ilustrar la influencia de algunos parámetros en el comportamiento hidráulico de una CCBE, diferentes autores han desarrollado un modelamiento numérico unidimensional (e.g., Aubertin et al., 1996; Choo y Yanful 2000). A continuación se presentan algunos de los resultados del modelamiento desarrollado por Bussiére et al.

(1995) y Aubertin et al. (1996), a fin de resaltar el impacto de los diferentes factores en el comportamiento hidráulico de una CCBE.

Figura 4-1 Configuración Típica de una CCBE para Limitar la Producción de ARD (Aubertin et al. 1995)



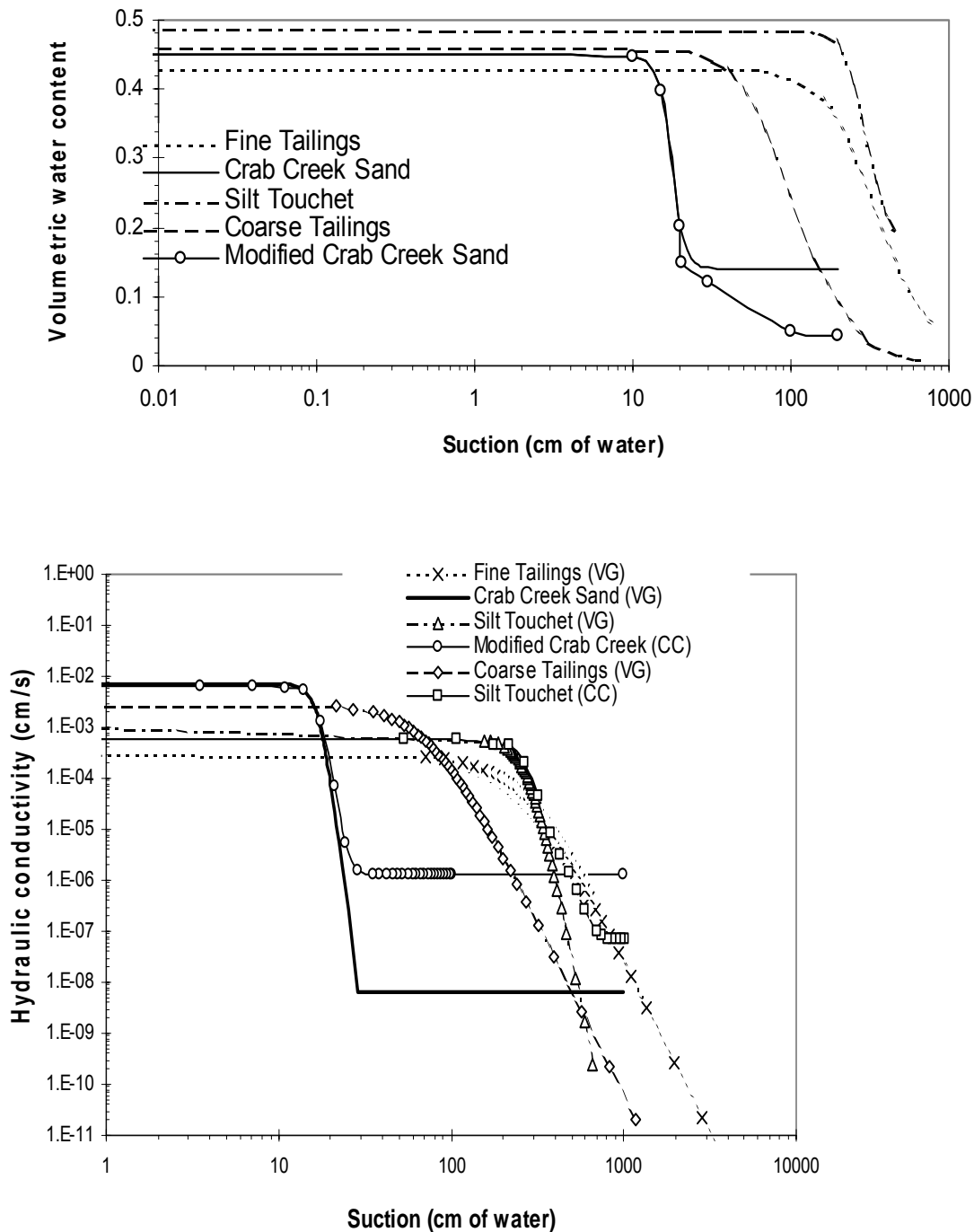
4.3.1 Descripción del Modelo Numérico

El comportamiento hidráulico unidimensional de una CCBE se modeló con un software de elemento finito *SEEP/W* (GEOSLOPE International, 2006), el cual puede simular varias situaciones, tales como el flujo saturado variable para condiciones continuas y transitorias. Se eligió el *SEEP/W* debido a que fuera utilizado con éxito anteriormente en varios estudios de flujo no saturado para coberturas colocadas sobre residuos de mina que generaban ácido (e.g., Woysner y Yanful 1995; Aubertin et al., 1996, 1997, 1999). Las condiciones del límite aplicadas a estos modelos numéricos no tenían precipitación/evaporación en la parte más alta ni drenaje en la base (con excepción de una simulación donde se aplicó una presión negativa en la base, correspondiente a una superficie freática de 2 m bajo la cobertura).

Las simulaciones se llevaron a cabo para simular un periodo de 56 días de drenaje. Estas condiciones son consideradas como el peor caso para un clima húmedo. Para facilitar la convergencia numérica, la superficie freática estuvo inicialmente en la parte más alta de la cobertura y fue bajada a la base en un periodo de una hora.

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

Figura 4-2 Propiedades Hidráulicas de los Materiales para el Modelamiento Numérico Unidimensional (Aubertin et al. 1996)



En las simulaciones numéricas se utilizaron cinco materiales diferentes, cuyas principales propiedades hidráulicas no saturadas se presentan en la Figura 4-2. Dos de estos materiales son suelos de grano fino y se utilizan como una capa de retención de humedad (limo Touchet y relaves finos); los otros tres suelos de grano grueso (relaves gruesos, arena Crab Creek y arena Crab Creek modificada) se utilizaron para crear los efectos de barrera capilar. Para los materiales de grano fino, los valores de la entrada del aire (ψ_a) son de aproximadamente 200 y 140 cm de agua para el limo

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

Touchet y para los relaves finos, respectivamente, mientras que para los suelos de grano grueso los valores ψ_a son de aproximadamente 30 cm y 15 cm de agua para los relaves gruesos y para las dos arenas Crab Creek, respectivamente. La principal diferencia entre la arena Crab Creek y la arena Crab Creek modificada es el contenido volumétrico de agua en la succión residual (θ_r), que son 0,14 y 0,04, respectivamente. Las funciones de permeabilidad de estos cinco materiales se presentan en la Figura 4-2. La función de permeabilidad de la arena Crab Creek, el limo Touchet, los relaves gruesos y los relaves finos se determinó de la CRA correspondiente con la expresión analítica de forma cerrada del modelo Mualem (1976) propuesto por van Genuchten (1980). La función de permeabilidad de la arena Crab Creek modificada se determinó con la solución iterativa del modelo Childs and Collis-George (1950) propuesto por Kunze et al. (1968).

Se simulan seis casos diferentes (véanse los detalles en la Tabla 4-2), los cuales permiten evaluar el impacto de las propiedades del suelo no saturado, la configuración de la cobertura y la ubicación de la superficie freática en el comportamiento hidráulico de la CCBE. En Bussièrè et al. (1995), Aubertin et al. (1996) y Bussièrè (1999) se pueden encontrar mayores detalles sobre estos modelamientos numéricos.

Tabla 4-2 Principales Características de los 6 Casos Modelados

Caso	Configuración de la cobertura	Suelos utilizados para cada capa	Posición de la superficie freática
1	2,5 m – capa de la base 1 m – capa de retención de humedad	Arena Crab Creek Limo Touchet	Base de la cobertura
2	2,5 m - capa de la base 1 m – capa de retención de humedad	Arena Crab Creek modificada Limo Touchet	Base de la cobertura
3	1 m – capa de la base 0,6 m - capa de retención de humedad 0,4 m – capa superior	Relaves gruesos Relaves finos Relaves gruesos	Base de la cobertura
4	1 m – capa de la base 0,6 m - capa de retención de humedad 0,4 m – capa superior	Arena Crab Creek Relaves finos Arena Crab Creek	Base de la cobertura
5	0,3 m – capa de la base 1 m - capa de retención de humedad	Arena Crab Creek Limo Touchet	Base de la cobertura
6	0,3 m – capa de la base 1 m - capa de retención de humedad	Arena Crab Creek Limo Touchet	2 m bajo la cobertura

4.3.2 Impacto de las Propiedades del Suelo No Saturado y Configuración de la Cobertura

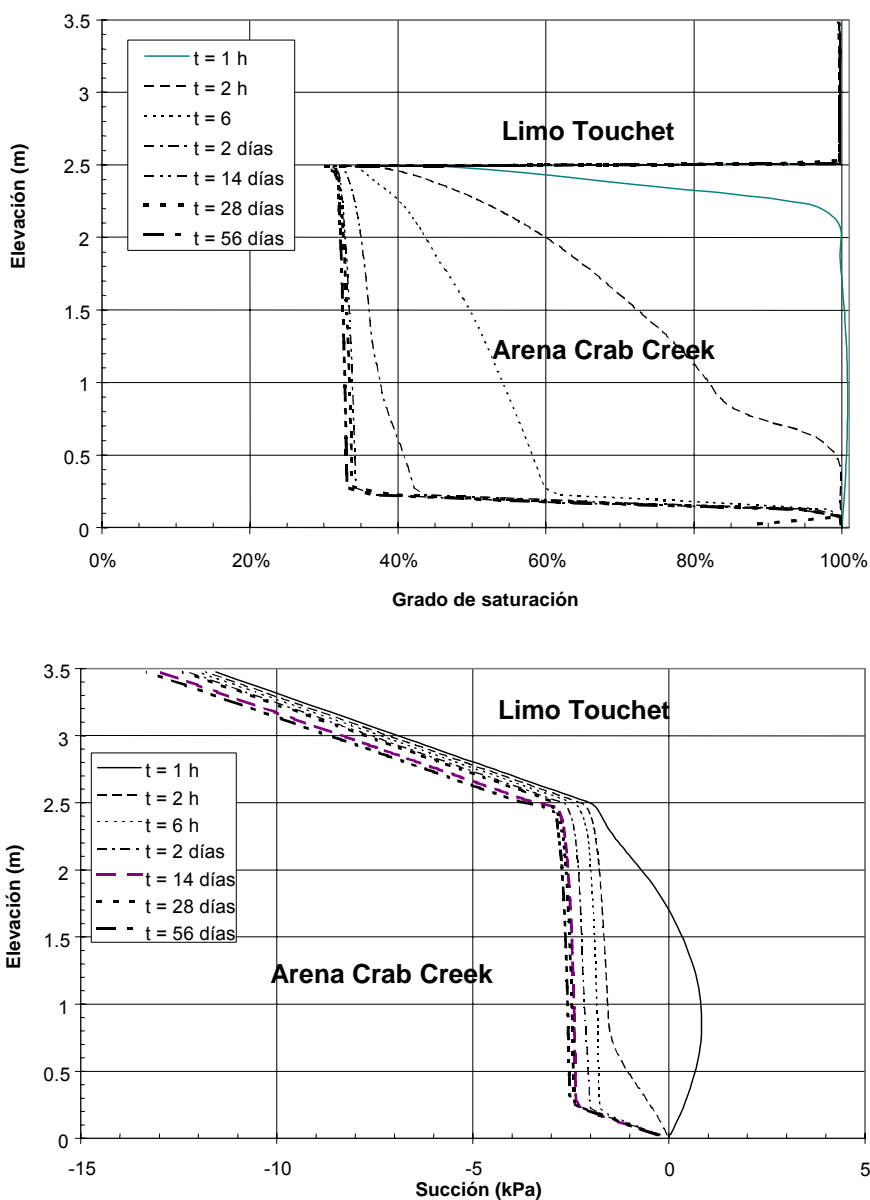
A fin de ilustrar el impacto de las propiedades del suelo no saturado en el comportamiento hidráulico de la CCBE se desarrollaron dos simulaciones para un sistema de cobertura de dos capas y otras dos simulaciones más para un sistema de tres capas.

Para el Caso 1, el sistema de cobertura de dos capas está hecho de 2,5 m de arena Crab Creek utilizada como capa de ruptura capilar y una capa de 1 m de espesor de limo Touchet utilizada como capa de retención de humedad. Los resultados numéricos en cuanto a grado de saturación y succión versus elevación se presentan en la Figura 4-3. Estos resultados numéricos muestran que la arena drena rápidamente para alcanzar su grado residual de saturación (o contenido volumétrico de agua residual) en un periodo de alrededor de 2 días. La capa de retención de humedad permanece casi saturada durante todo el periodo de modelamiento de 56 días. El perfil de succión

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

muestra el comportamiento típico de una barrera capilar. En efecto, después de aproximadamente 2 días, aparece una ruptura (línea vertical) en el perfil de succión; la succión no se incrementa con la elevación entre elevaciones de 0,3 m y 2,5 m. Esta ruptura reduce la succión en la interfaz con la capa de grano fino y, en consecuencia, la succión en la capa. En lugar de tener una succión equivalente al equilibrio estático (succión = elevación que corresponde a 35 kPa), la succión máxima en la capa de retención de humedad es de aproximadamente 13 kPa. En cuanto a la eficacia para limitar la migración del oxígeno, esta cobertura será eficaz debido a su capacidad para mantener un alto grado de saturación (S_r) en la capa de retención de humedad (un valor alto de S_r significa un coeficiente de difusión efectiva bajo D_e y un flujo de oxígeno bajo).

Figura 4-3 Evolución del Grado de Saturación y Succión en Cobertura de Dos Capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek



Evolución del Grado de Saturación (arriba) y Succión en la Cobertura de Dos Capas hecha de Limo Touchet y Arena Crab Creek durante un período de drenaje de 56 días (Aubertin et al. 1996).

Para el Caso 2, el cual es similar al Caso 1 excepto que la capa de grano grueso de la base está hecha de arena Crab Creek modificada (véase la Tabla 4-2), los resultados numéricos del grado de saturación y succión se presentan en la Figura 4-4. Estos resultados muestran que una ligera modificación de la curva de retención de agua de la capa de grano grueso ($\theta_r = 0,04$ en lugar de $0,14$) cambia significativamente el comportamiento hidráulico de la cobertura de dos capas. La arena continúa desaturando incluso después de 56 días. Esta desaturación de la capa de grano grueso de la base influye en la capa de retención de humedad de la parte superior que también empieza a desaturar en la parte más alta. Los resultados de la succión muestran que la ruptura en el perfil de succión (línea vertical) desaparece lentamente, por lo tanto el perfil de succión se mueve hacia el equilibrio estático. Esto implica una succión más alta en la interfaz y succiones más altas en las capas de retención de humedad (el valor de succión más alto es de 20 kPa) que explica la desaturación en la parte más alta de la capa (la succión es mayor que el ψ_a del limo Touchet). En este caso en particular, la cobertura probablemente será todavía eficiente para limitar la migración del oxígeno debido al alto grado de saturación en la capa de retención de humedad después de 56 días, aunque un periodo seco más acentuado podría tener un impacto en la capacidad de la cobertura para limitar la migración del oxígeno.

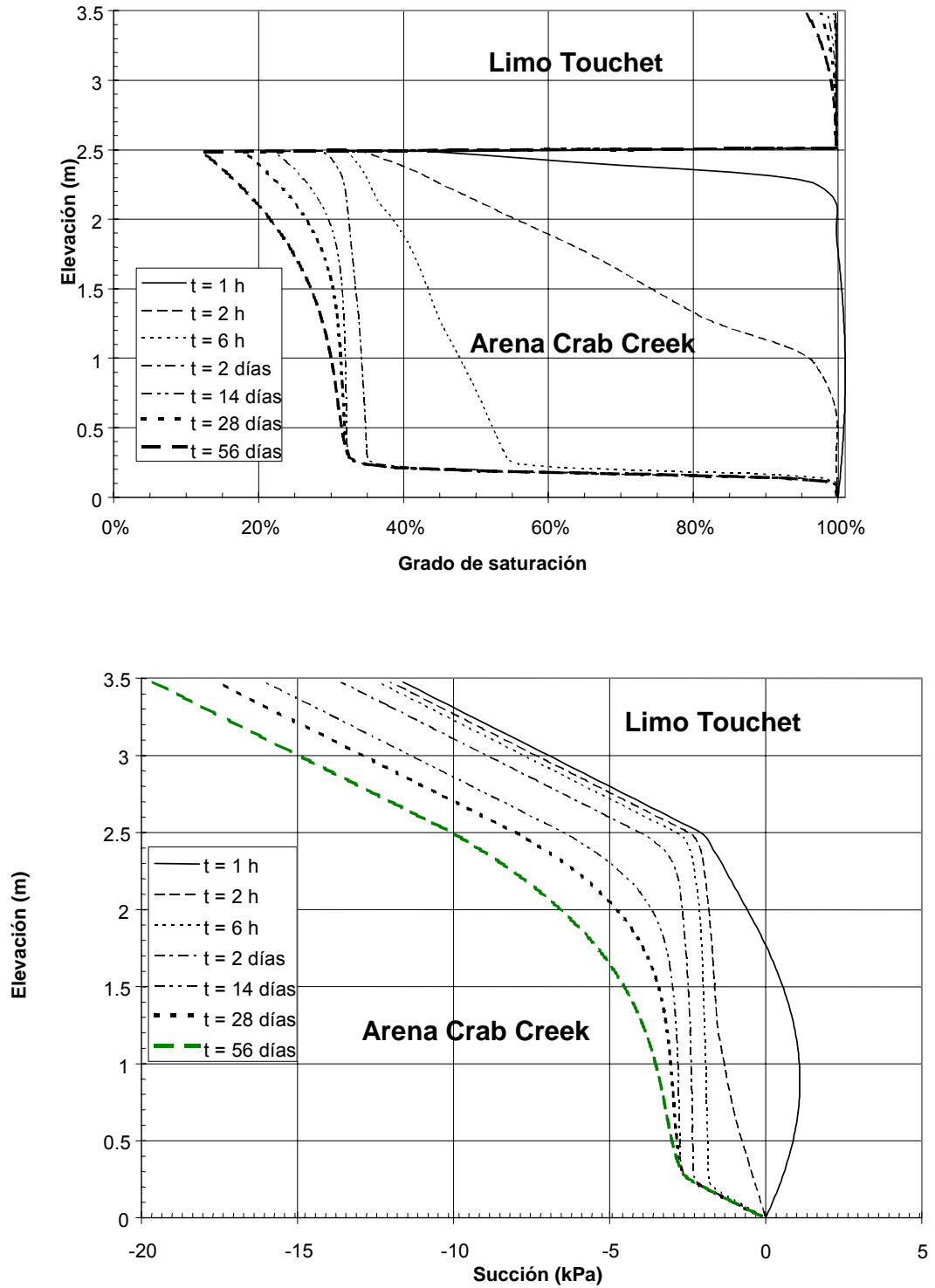
Para las coberturas de tres capas, frecuentemente utilizadas en climas húmedos para limitar la migración del oxígeno (por ejemplo, Ricard et al., 1997; Dagenais et al., 2005), se realizaron dos simulaciones numéricas: el Caso 3 y el Caso 4 (véanse los detalles en la Tabla 4-2). Para el Caso 3, se utilizan relaves gruesos y finos como materiales de cobertura. Los principales resultados numéricos (grado de saturación y succión en la cobertura) se presentan en la Figura 4-5. Estos resultados muestran que la capa de la base no está completamente desaturada, mientras que la capa de la parte más alta está próxima a su contenido volumétrico de agua residual después de 2 días. La figura también muestra que la capa de retención de humedad empieza a desaturar y alcanza un valor S_r de aproximadamente 90% después de 56 días. El perfil de succión muestra también que los efectos de la barrera capilar (representados por la ruptura en el perfil de succión) desaparecieron en menos de 2 días. Después de 2 días, el perfil de succión corresponde al equilibrio estático.

Para el Caso 4, donde se utiliza arena Crab Creek como suelo de grano grueso en el sistema de cobertura en lugar de relaves gruesos, el comportamiento hidráulico de esta cobertura es completamente diferente al del Caso 3 (véase la Figura 4-6). Esta figura muestra que las dos capas de grano grueso alcanzaron su contenido volumétrico de agua residual después de aproximadamente 2 días, mientras que la capa de retención de humedad mantuvo un valor S_r alto (>95%) después de 56 días. Los perfiles de succión muestran los efectos de la barrera capilar (perfil de succión vertical) en la capa de arena de la base que reducen la succión en la capa de retención de humedad (lo que explica el alto grado de saturación). En cuanto a la limitación de la migración del oxígeno, la cobertura del Caso 4 será más eficiente que la del Caso 3 debido a los valores S_r más altos en la capa de retención de humedad que están relacionadas con la presencia de los efectos de la barrera capilar en la capa gruesa de la base.

En conclusión, los resultados numéricos del Caso 1 al 4 muestran claramente la importancia de las propiedades del material, tanto para los sistemas de cobertura de dos capas como de tres capas. Cuanto más acentuado es el contraste entre los materiales, mejor es el desempeño de la cobertura para limitar la migración del oxígeno. Estos resultados demuestran la importancia de realizar una evaluación precisa de las propiedades de los materiales antes de diseñar una cobertura CCBE.

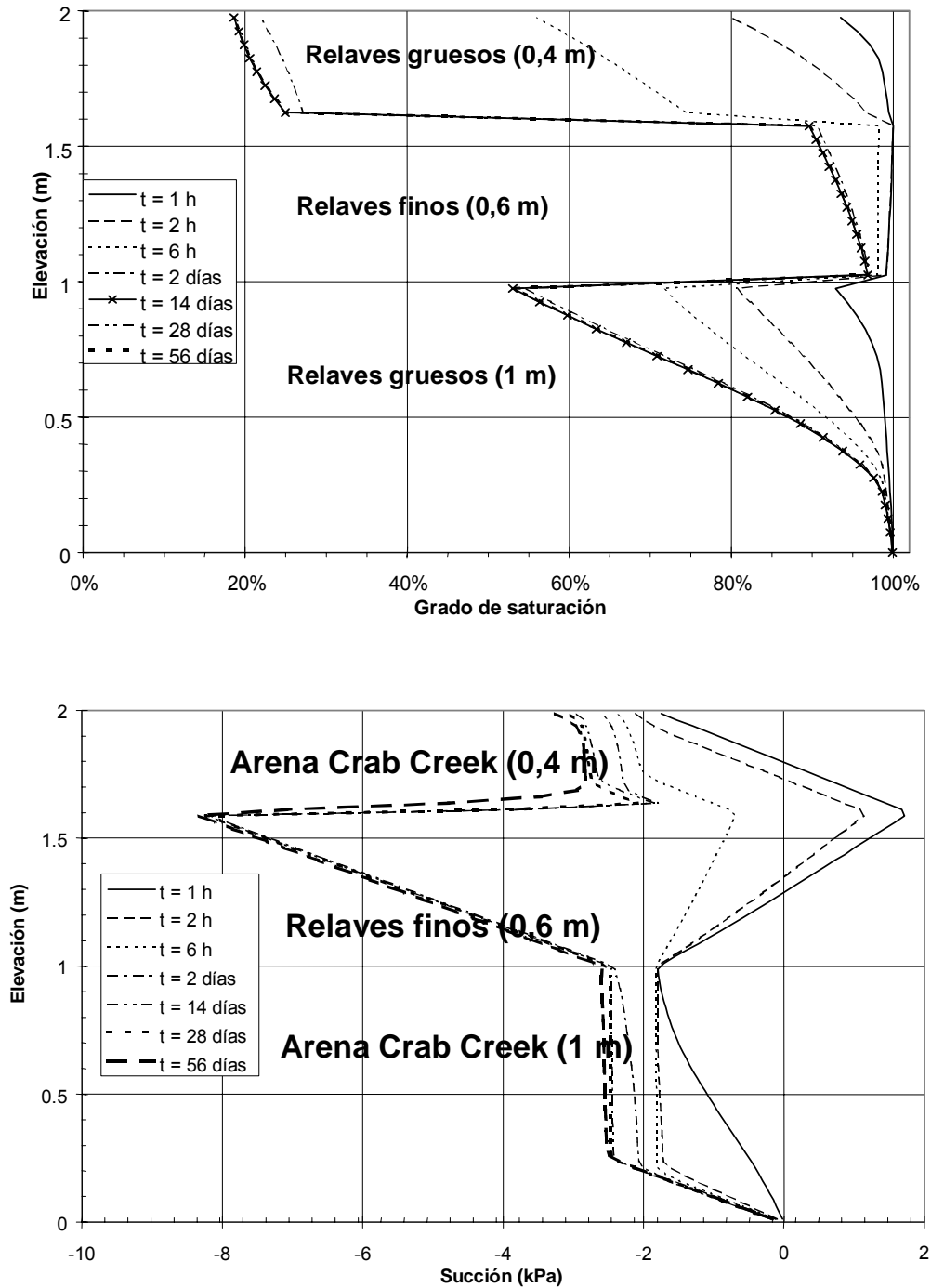
Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

Figura 4-4 Evolución del Grado de Saturación y Succión en Cobertura de Dos Capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek Modificada



Evolución del grado de saturación (arriba) y succión en la cobertura de dos capas hecha de Limo Touchet y Arena Crab Creek modificada durante un periodo de drenaje de 56 días (Aubertin et al. 1996).

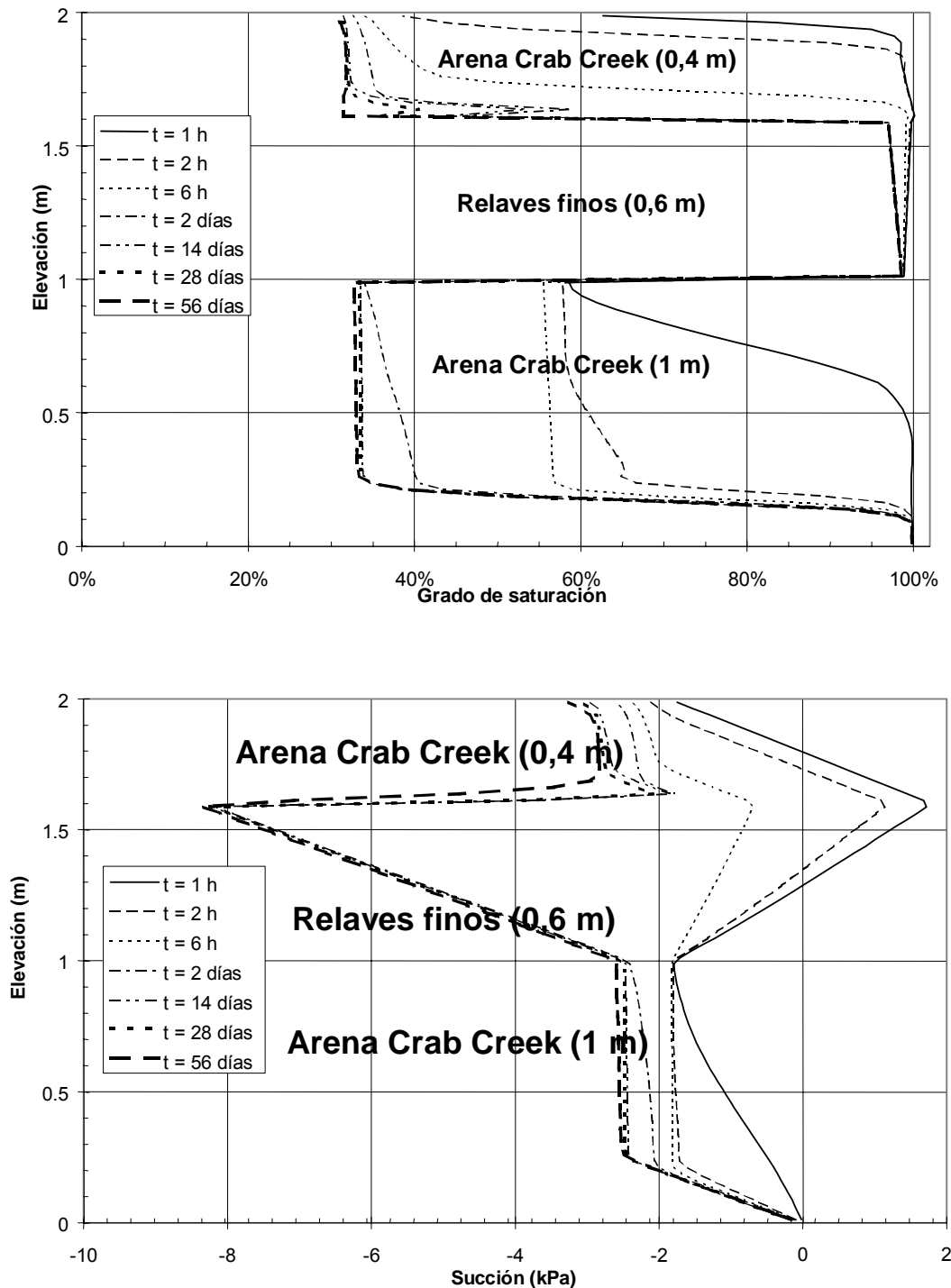
Figura 4-5 Evolución del Grado de Saturación (arriba) y Succión en la Cobertura de Tres Capas de Relaves Finos



Evolución del Grado de Saturación (arriba) y Succión en la Cobertura de Tres Capas hecha de relaves finos colocada entre dos capas de relaves gruesos durante un periodo de drenaje de 56 días (Aubertin et al. 1996).

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

Figura 4-6 Evolución del Grado de Saturación y Succión en la Cobertura de Tres Capas de Relaves Finos colocada entre Dos Capas de Arena Crab Creek

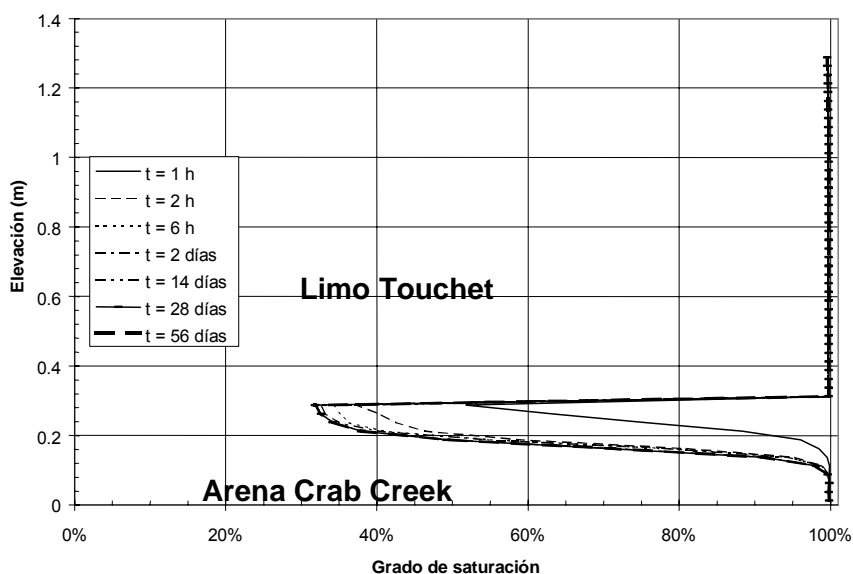


Evolución del Grado de Saturación (arriba) y succión en la cobertura de tres capas hecha de relaves finos colocada entre dos capas de Arena Crab Creek durante un periodo de drenaje de 56 días (Aubertin et al. 1996).

4.3.3 Impacto de la capa de grano grueso de la base

Como se mostró en el análisis numérico anterior, la capa de grano grueso de la base (en una CCBE bien diseñada) crea efectos de barrera capilar que permiten mantener un alto grado de saturación en la capa de retención de humedad (necesaria para limitar la migración del oxígeno). En el análisis numérico anterior, el espesor de esta capa fue mayor de 1 m; en los siguientes análisis numéricos este espesor se reducirá a 0,3 m para ilustrar el impacto de la reducción del espesor de la capa de grano grueso de la base en el comportamiento hidráulico de la cobertura. Los resultados de la simulación numérica para el Caso 5 (véanse los detalles en la Tabla 4-2) se presentan en la Figura 4-7. Estos resultados muestran que una reducción de 0,3 m en el espesor no afecta el grado de saturación de la capa de retención de humedad que permanece cercana al 100% (resultados similares a los del Caso 1). Los perfiles de succión (que no se muestran en este documento) durante el modelamiento son similares al de los primeros 0,3 m del Caso 1 (véase la Figura 4-3). Esto implica que el espesor óptimo de la capa de grano grueso de la base depende de las propiedades no saturadas del suelo. Esta observación concuerda con los resultados del modelamiento numérico realizado por Aachib (1997) y muestra que un espesor correspondiente al doble de ψ_a del suelo suele ser suficiente para crear los efectos de barrera capilar deseados en la cobertura.

Figura 4-7 Evolución del Grado de Saturación en la Cobertura de Dos capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek



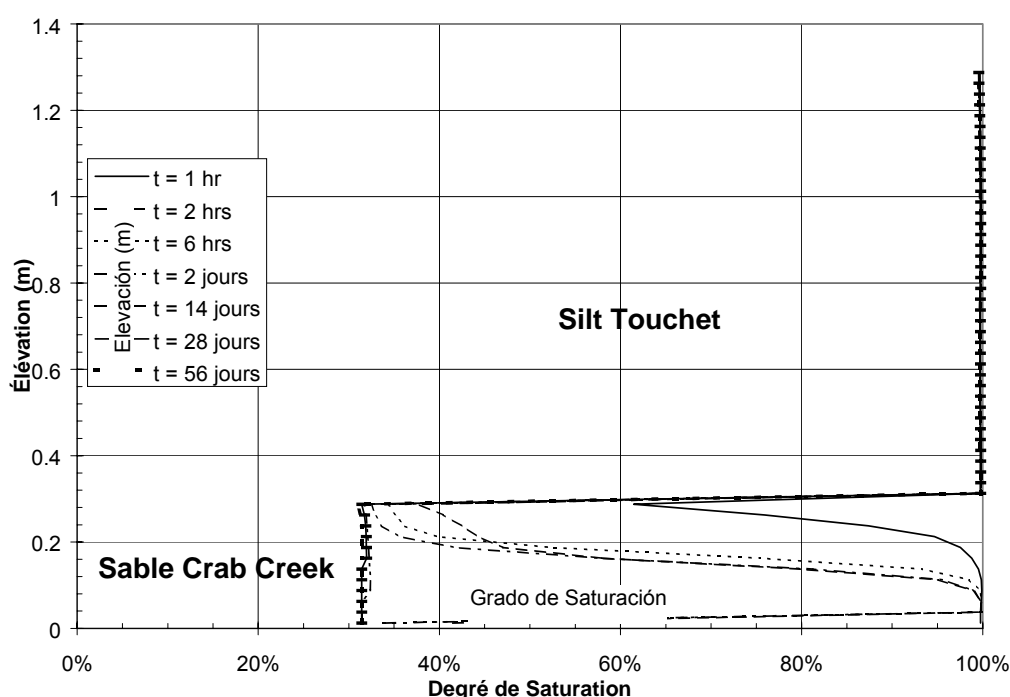
Evolución del Grado de Saturación en la Cobertura de Dos capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek (0.3 m espesor) durante un periodo de drenaje de 56 días (Aubertin et al. 1996).

4.3.4 Impacto de la Superficie Freática

El impacto de la ubicación de la superficie freática se evalúa en el Caso 6 mediante una comparación con el Caso 5. La principal diferencia entre estos casos corresponde a la condición del límite de la base que corresponde a la superficie freática; esta última está ubicada en la cobertura de la base y 2 m bajo la cobertura de la base para los Casos 5 y 6, respectivamente (véase la Tabla 4-2). Los perfiles del grado de saturación para el Caso 6 se presentan en la Figura 4-8, donde se muestra que el

drenaje de la capa de arena de la base es más acentuado que el observado en el Caso 5 (véase la Figura 4-7); el grado residual de saturación se alcanza en el espesor total de la capa después de 14 días aproximadamente. Sin embargo, debido a los efectos de la barrera capilar, el grado de saturación de la capa de retención de humedad no se ve afectado después de 56 días. Nuevamente, estos resultados muestran la importancia de la capa de grano grueso de la base para limitar la transferencia de succión a la capa de retención de humedad; también muestran que el impacto de la ubicación de la superficie freática se limita principalmente a la capa de grano grueso de la base (en este caso).

Figura 4-8 Evolución del Grado de Saturación en la Cobertura de Dos capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek



Evolución del Grado de Saturación en la Cobertura de Dos capas de Limo Touchet y Arena Crab Creek (0.3 m de espesor) asumiendo una superficie freática a 2 m bajo la cobertura, durante un periodo de drenaje de 56 días (Aubertin et al. 1996).

4.4 Impacto de la Pendiente - Análisis Numérico Bidimensional

Como se mostró en las secciones anteriores, muchos factores influyen en el comportamiento hidráulico de una CCBE y en su capacidad para funcionar apropiadamente, entre los que se encuentran las propiedades del material, condiciones climáticas, espesor de la capa y la ubicación de la superficie freática. Sin embargo, las coberturas construidas para aplicaciones en el mundo real suelen ser inclinadas, con pendientes que varían desde moderadas hasta empinadas. En estas situaciones, se tienen que considerar los efectos del flujo vertical y horizontal (Aubertin et al. 1997; Bussi re et al. 1998, Aubertin y Bussi re 2001). De hecho, el comportamiento de una cobertura inclinada con barrera capilar, en una situación real, puede ser considerablemente diferente del comportamiento de un modelo unidimensional idealizado. En la bibliografía relacionada con el tema, se puede encontrar muchos ejemplos que demuestran cómo la pendiente influye en el

comportamiento hidráulico no saturado de los suelos con declive uniformes o con capas (por ejemplo, Garber y Zaslavsky 1977; Zaslavsky y Sinai 1981a, 1981b; Nieber y Walter 1981; Stagnitti et al., 1986, 1992; McCord y Stephens 1987; Selim 1988; Miyazaki 1988, 1993; Wallach y Zaslavsky 1991; Jackson 1992; Steenhuis et al., 1999). Debido a que el grado de saturación en la capa de suelo de grano fino (capa de retención de humedad) influye en el coeficiente de difusión efectiva y el flujo correspondiente, la capacidad de una cobertura para controlar la migración de gases debe por consiguiente tomar en consideración dichos efectos geométricos.

A continuación, se desarrolló un estudio numérico basado en un caso de campo real (cobertura de LTA; véanse más detalles en el Capítulo 7) para cuantificar los efectos geométricos en el desempeño de una CCBE construida para limitar la difusión de gases. Se realizó un análisis de sensibilidad partiendo de la situación real. Los principales parámetros investigados fueron la inclinación y longitud de la pendiente (aquí no se presenta la longitud de la pendiente debido al pequeño impacto de este parámetro, véase Bussièrre et al. 2003a para mayor información), el periodo de drenaje y las curvas de retención de agua de los materiales. Vale la pena mencionar aquí que primero se desarrolló un análisis numérico a escala menor en un laboratorio preparado (llamado la caja inclinada). Se pueden encontrar más detalles sobre estos resultados en Bussièrre et al. (2002, 2003a).

4.4.1 Descripción del Modelo Numérico

Cuando una CCBE es inclinada, se deben considerar los efectos del flujo no saturado vertical y horizontal (e.g., Aubertin et al., 1997; Bussièrre, 1999; Bussièrre et al., 2003a). Debido a la geometría particular (sistema inclinado de capas), las diferentes propiedades del material y las condiciones variables del límite, se puede pronosticar el comportamiento hidráulico de una CCBE dada sólo mediante el modelamiento numérico del flujo de agua no saturada.

El modelo numérico utilizado en este estudio se basa en una situación real. Las principales características del modelo y de los materiales son:

- La inclinación (α) de la cobertura con declive varía entre 11,3° y 18,4° (5H:1V a 3H:1V).
- El modelo también incluye una sección horizontal de 25 m en la parte más alta del botadero. Los análisis numéricos preliminares indican que, en esta ubicación, el flujo horizontal en la cobertura es insignificante, por lo que no se aplicó ninguna condición del límite del flujo para limitar el tamaño del modelo (véase la Figura 4-9).
- La superficie freática está ubicada inicialmente en los relaves sulfurosos; esta superficie freática había sido observada en las lecturas del piezómetro en el campo (según un estudio de caso real en el sitio LTA; véase McMullen et al., 1997, para mayores detalles).
- En las simulaciones, se presenta el drenaje inferior existente en la base de la pendiente.
- En los cálculos no se considera la evaporación, ya que en estudios previos se ha demostrado que no tendría un efecto significativo en el comportamiento de la capa de retención de humedad en un sistema de tres capas, tal como la cobertura simulada en este estudio (Yanful y Choo, 1997; Aachib, 1997; Aubertin et al., 1999; Dagenais 2005).
- La carga de presión inicial en cada nodo, requerida para los análisis transitorios, se obtuvo del análisis del estado continuo empleando el mismo modelo. En dicha simulación, se aplicó un flujo de infiltración de 30 mm/mes (condiciones promedio del sitio para la precipitación menos la evaporación y la escorrentía) a la parte más alta de la cobertura. Partiendo de estas condiciones iniciales, se simuló un periodo de drenaje

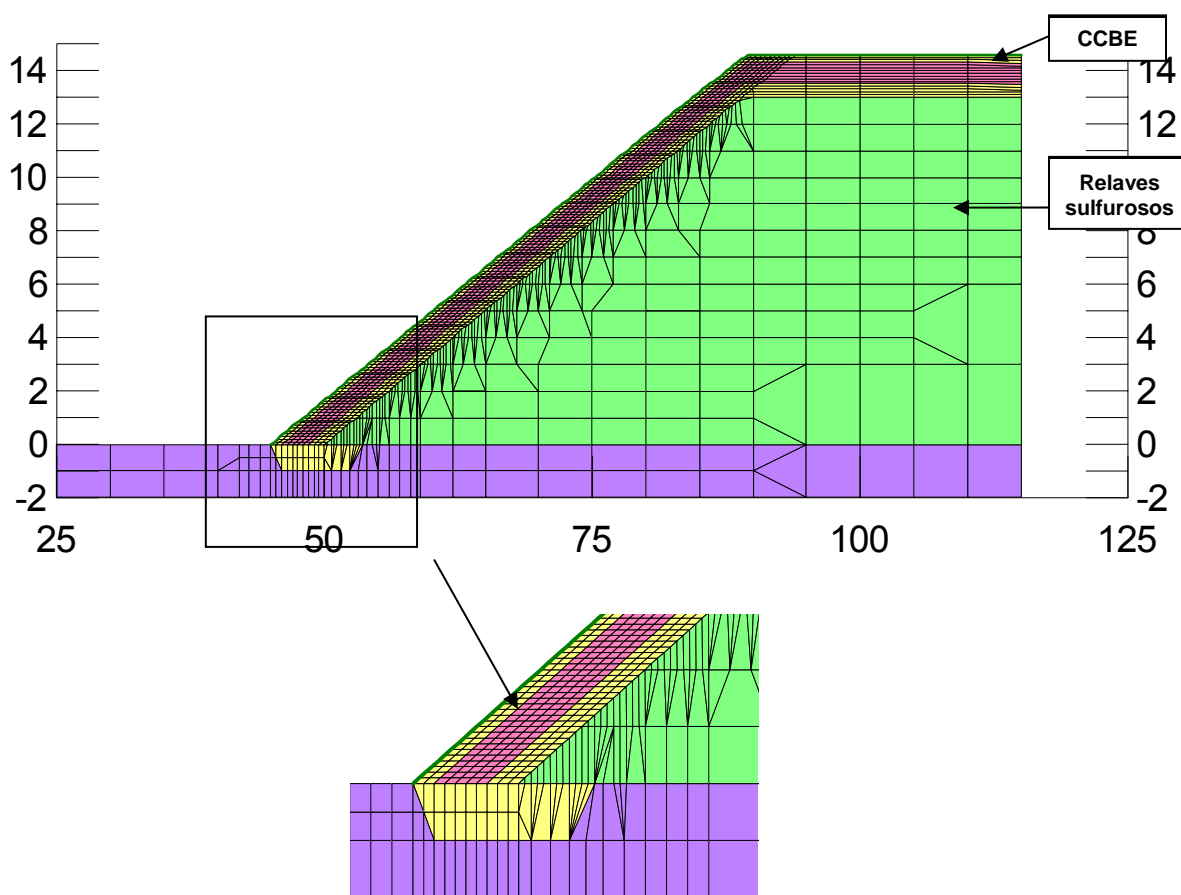
Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

de 60 días para cada escenario; este periodo corresponde a una situación extrema de sequía para un clima húmedo.

- El espesor de las diferentes capas de la CCBE es: 0,5 m de arena en la base, 0,8 m de material de grano fino (se estudiaron tres tipos de material: relaves de MRN, limo fino y limo grueso) y 0,3 m de arena en la parte más alta.
- En la Figura 4-10 se presentan las funciones hidráulicas requeridas por cada material para realizar el modelamiento numérico del flujo no saturado en el medio poroso. Según se puede observar en esta figura, existe una diferencia significativa en las propiedades de retención de agua entre la arena LTA y los materiales de grano fino (relaves de MRN, limo fino y limo grueso; véanse las propiedades hidráulicas en la Tabla 4-3) utilizados para la capa de retención de agua. Este contraste es muy útil para crear una cobertura efectiva con efectos de barrera capilar.
- Las funciones de permeabilidad presentadas en la Figura 4-10 fueron determinadas por la WRC correspondiente con la expresión analítica de forma cerrada (véase el Capítulo 2) del modelo de Mualem (1976) propuesto por van Genuchten (1980).

Las principales características de cada simulación se presentan en la Tabla 4-4. Se pueden encontrar más detalles sobre estas simulaciones numéricas en Bussièrè (1999) y en Bussièrè et al. (2003a,b).

Figura 4-9 Malla Típica Utilizada en los Cálculos de Flujo No Saturado

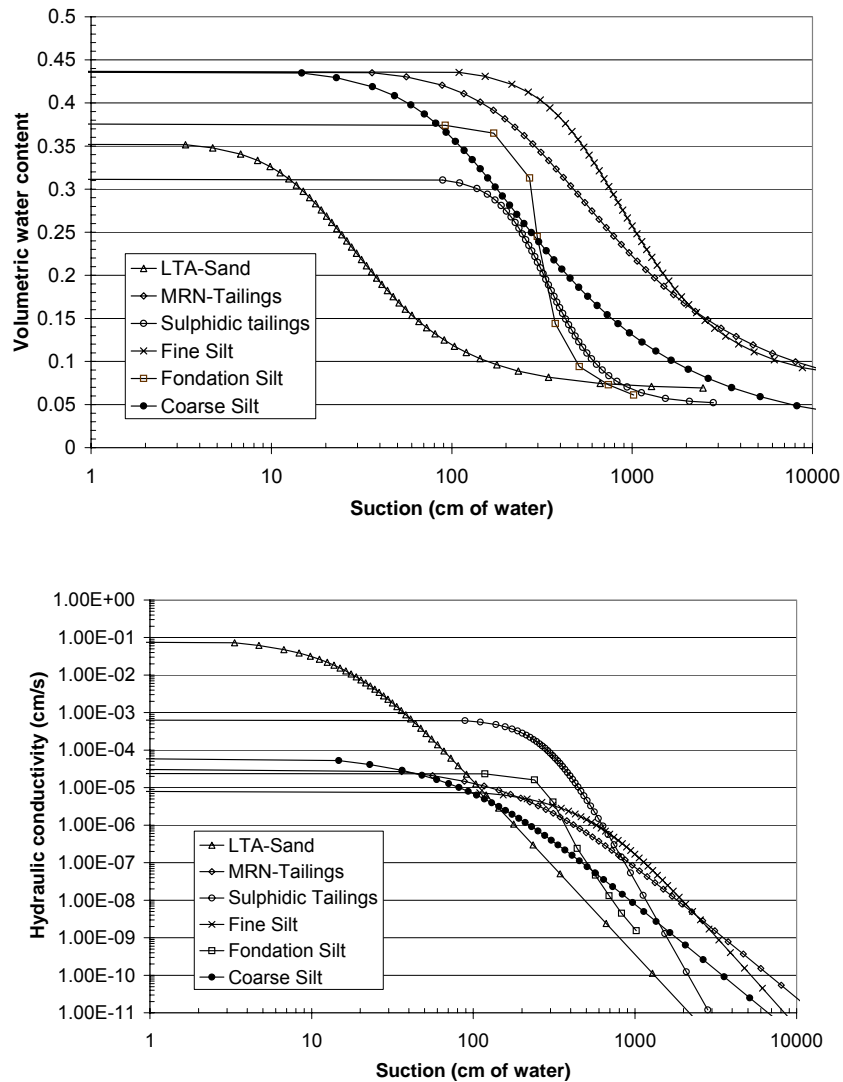


50

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

Malla Típica Utilizada en los Cálculos de Flujo No Saturado y un primer plano de parte de la base del talud (Bussiére et al. 2003a).

Figura 4-10 Curvas de Retención de Agua y Funciones de Permeabilidad de los Suelos Utilizados



Curvas de Retención de Agua y Funciones de Permeabilidad de los suelos utilizados en el caso de estudio del sitio LTA (Bussiére et al. 2003a).

Efecto del ángulo de la pendiente en la distribución del agua en la capa de retención de humedad.

Después de validar el modelo con la información medida en el campo (véanse los detalles en Bussiére et al. 2003a), se desarrollaron análisis numéricos para evaluar el efecto del ángulo de la pendiente para tres casos (Caso 1, 3 y 4 respectivamente; véanse los detalles en la Tabla 4-4). Para estos tres casos, se puede observar una desaturación cerca a la parte más alta de la pendiente (véase la Figura 4-11 para el Caso 1). Por otro lado, la base de la pendiente permanece casi saturada. A fin de representar los resultados de manera más simple, el grado de saturación ($S_r = \theta/n$ con $n = \theta_{sat} = 0.44$; θ es el contenido volumétrico de agua, n es la porosidad y θ_{sat} es el contenido volumétrico de agua en la saturación) en el centro (profundidad media) de la

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

capa de retención de humedad se presenta como una función de la posición a lo largo de la cobertura con declive. En la Figura 4-12 se proporcionan ejemplos de esta presentación para los Casos 1 y 4. Para un periodo similar de drenaje, se puede observar una diferencia en la distribución de la humedad en la capa de retención de humedad. La pendiente más empinada (Caso 1) induce típicamente un grado más bajo de saturación (o contenido volumétrico de agua) a una distancia dada desde la base de la pendiente que la menos inclinada (Caso 4).

Tabla 4-3 Principales Propiedades Hidráulicas de los Materiales Utilizados

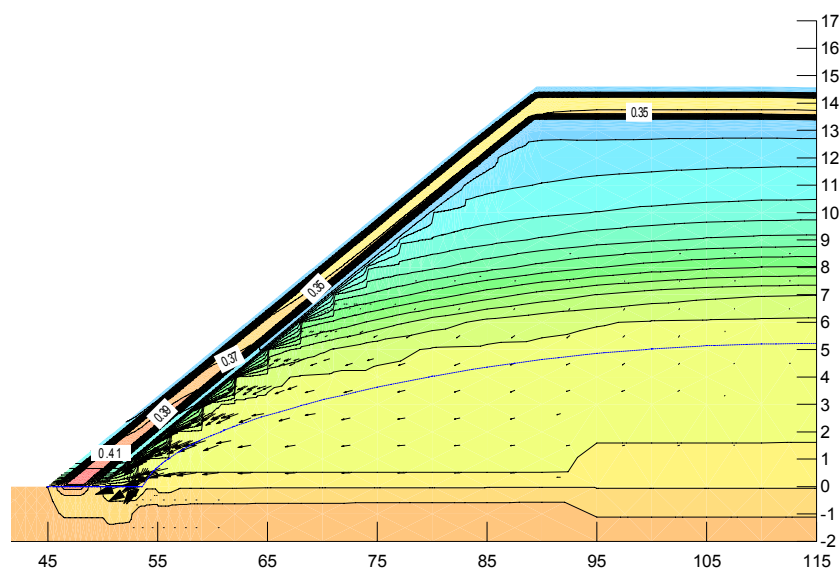
Materiales	ψ_a (cm de agua)	ψ_r (cm de agua)	θ_s o n	k_{sat} (cm/s)	α_v (cm ⁻¹)	n_v
Arena de LTA	20	100	0,36	1×10^{-1}	0,0496	2,06
Relaves de MRN	284	3 500	0,44	$5,0 \times 10^{-5}$	0,0034	1,63
Relaves sulfurosos	303	700	0,31	$7,0 \times 10^{-4}$	0,0033	3,27
Limo fino	625	3 500	0,44	$9,9 \times 10^{-6}$	0,0016	2,14
Limo de base	323	400	0,38	$2,3 \times 10^{-5}$	0,0031	3,48
Limo grueso	120	1 050	0,44	$1,0 \times 10^{-4}$	0,0083	1,61

Principales propiedades hidráulicas de los materiales utilizados en el caso de estudio real del sitio LTA; ψ_a es el valor de la entrada del aire, ψ_r es la presión correspondiente al contenido volumétrico de agua residual, θ_s es el contenido volumétrico de agua en la saturación, k_{sat} es la conductividad hidráulica saturada y α_v y n_v son las constantes de la ecuación de van Genuchten (1980).

Tabla 4-4 Principales Características de las Simulaciones Numéricas Desarrolladas en las Presas de Relaves Cubiertos

Caso	Inclinación de la pendiente	Longitud de la pendiente (m)	Material de retención de humedad (m de agua)	Condiciones del límite
#1	3:1	50	Relaves de MRN	60 días de drenaje
#2	3:1	50	Limo fino	60 días de drenaje
#3	4:1	50	Relaves de MRN	60 días de drenaje
#4	5:1	50	Relaves de MRN	60 días de drenaje
#5	3:1	50	Limo grueso	60 días de drenaje

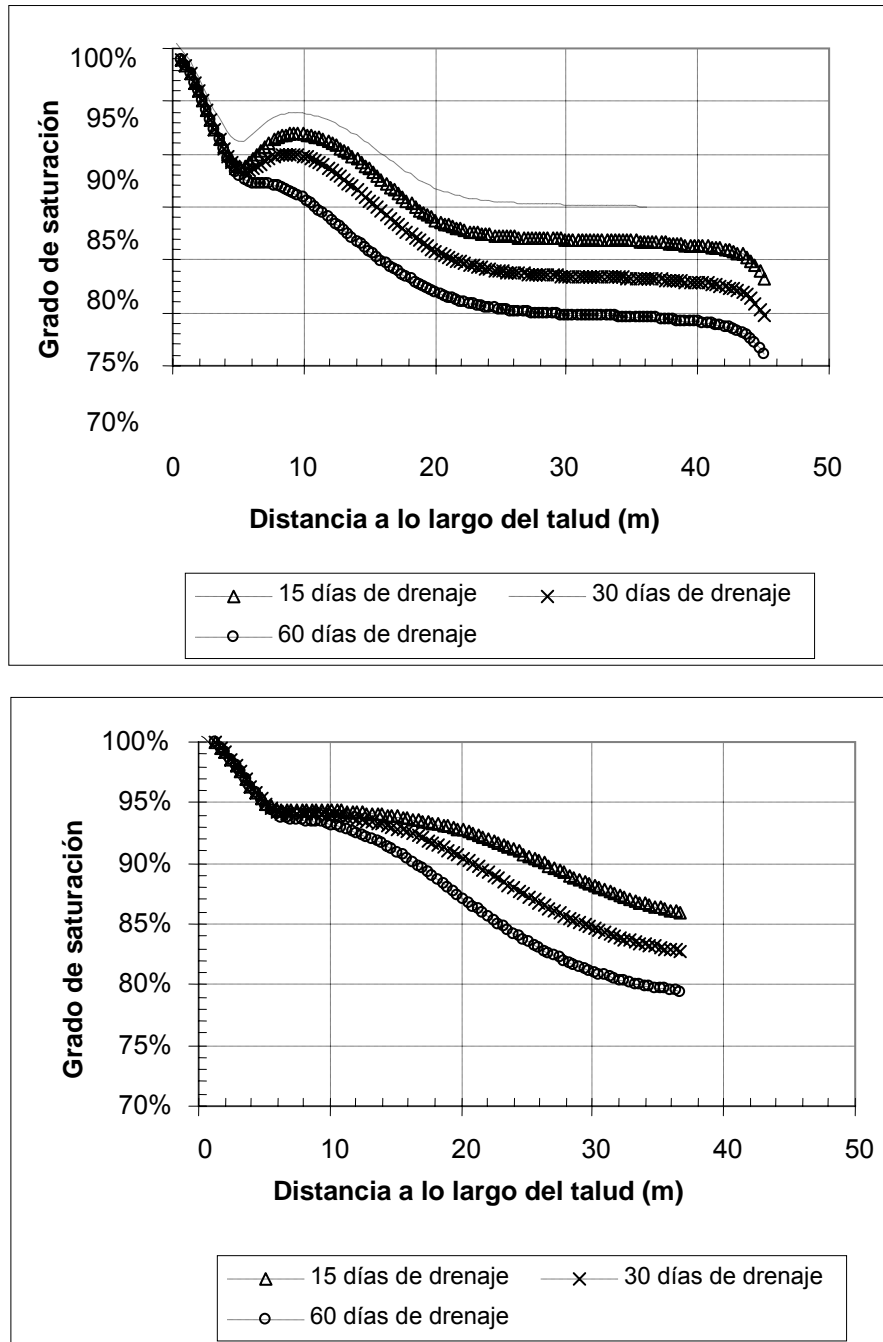
Figura 4-11 Distribución del Contenido Volumétrico de Agua



Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

Distribución del Contenido Volumétrico de Agua después de un período de drenaje de 60 días para las siguientes características: inclinación del talud 3:1, relaves de MRN como material de retención de humedad y un talud de 50 m de longitud (Bussiére et al. 2003b).

Figura 4-12 Evolución del Grado de Saturación



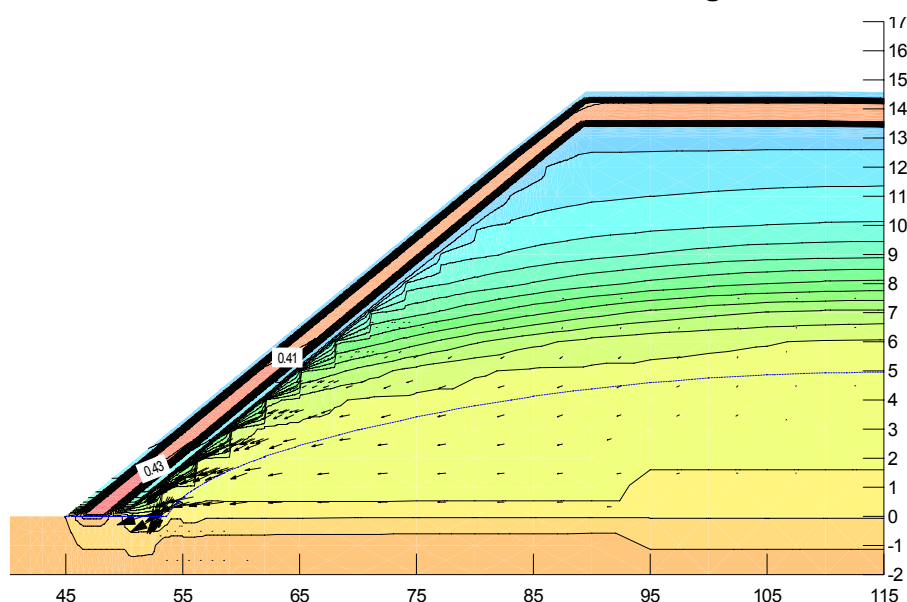
Evolución del Grado de Saturación en el Centro (profundidad media) de la Capa de Retención de Humedad como una función de la posición a lo largo del talud (0 = base del talud) para una inclinación de pendiente de 18° (gráfico superior) y 11,3° (gráfico inferior) (Bussiére et al. 2003a).

4.4.2 Efecto de las propiedades del material en la distribución del agua en la capa de retención de humedad

La curva de retención de humedad del material de grano fino es un parámetro fundamental para la tecnología de la CCBE. Con el fin de estudiar la influencia de la curva de retención de agua (WRC) en el comportamiento hidráulico de una CCBE inclinada, se desarrollaron otros dos análisis numéricos. Estas simulaciones son similares al Caso 1 representado en la Figura 4-11 (longitud de la pendiente de 50 m e inclinación de 3H:1V; véase la Tabla 4-4), excepto que las capas de retención de humedad están hechas de limo fino (Caso 2) y de limo grueso (Caso 5), en lugar de relaves de MRN (véanse las propiedades hidráulicas en la Tabla 4-3 y en las Figuras 4-10).

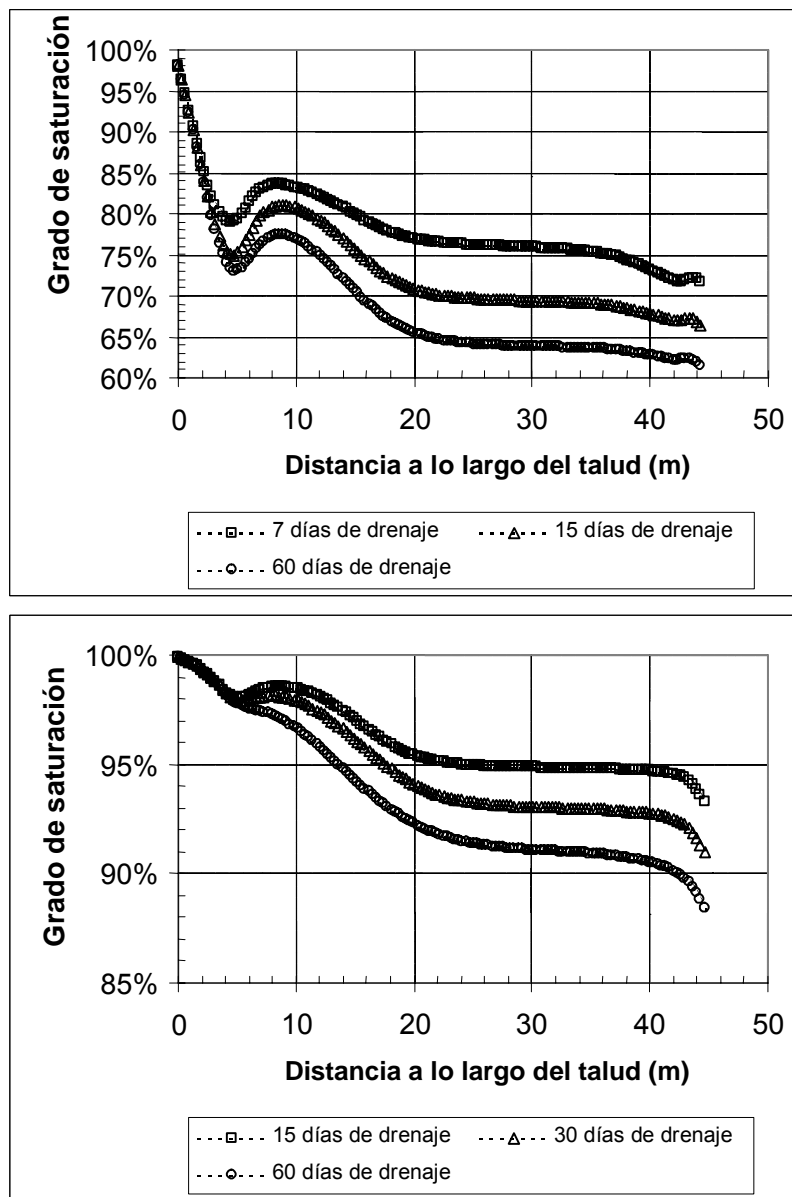
Algunos de los resultados de los cálculos se presentan en las Figuras 4-13 y 4-14. Al comparar la Figura 4-13 y la Figura 4-11, se puede observar que la retención del agua es mucho más importante cuando se utiliza limo fino en lugar de relaves de MRN. La parte más alta de la pendiente sólo se desatura ligeramente después de 60 días de drenaje cuando se utiliza limo fino como material de retención de humedad. Asimismo, para el limo grueso, la desaturación de la pendiente es más importante que los otros materiales (resultados no mostrados aquí). En la Figura 4-14 se proporciona una comparación entre el valor S_r en la profundidad media de la capa de retención de humedad para la cobertura hecha con limo fino y limo grueso. Se puede observar que, por ejemplo, el valor más bajo de S_r después de 60 días de drenaje en la parte más alta de la pendiente es de aproximadamente 61% para la simulación con limo grueso, en comparación con un valor S_r de aproximadamente 88% en la misma ubicación obtenida con el limo fino. Esta diferencia en la distribución de la humedad afecta considerablemente el desempeño de la CCBE para limitar la difusión de gases.

Figura 4-13 Distribución del Contenido Volumétrico de Agua



Distribución del Contenido Volumétrico de Agua después de 60 días de drenaje para las siguientes características del modelo: inclinación del talud 3:1, limo fino como material de retención de humedad y pendiente de 50 m de longitud (Bussièrre et al. 2003b).

Figura 4-14 Evolución del Grado de Saturación en el Centro de la Capa de Retención de Humedad



Evolución del grado de saturación en el centro (profundidad media) de la capa de retención de humedad como una función de la posición a lo largo del talud (0 = base del talud) cuando se utilizan limo grueso (gráfico superior) y limo fino (gráfico inferior) como material de grano fino (Bussiére et al. 2003a).

4.4.3 Impacto sobre la Capacidad para Limitar la Migración del Oxígeno

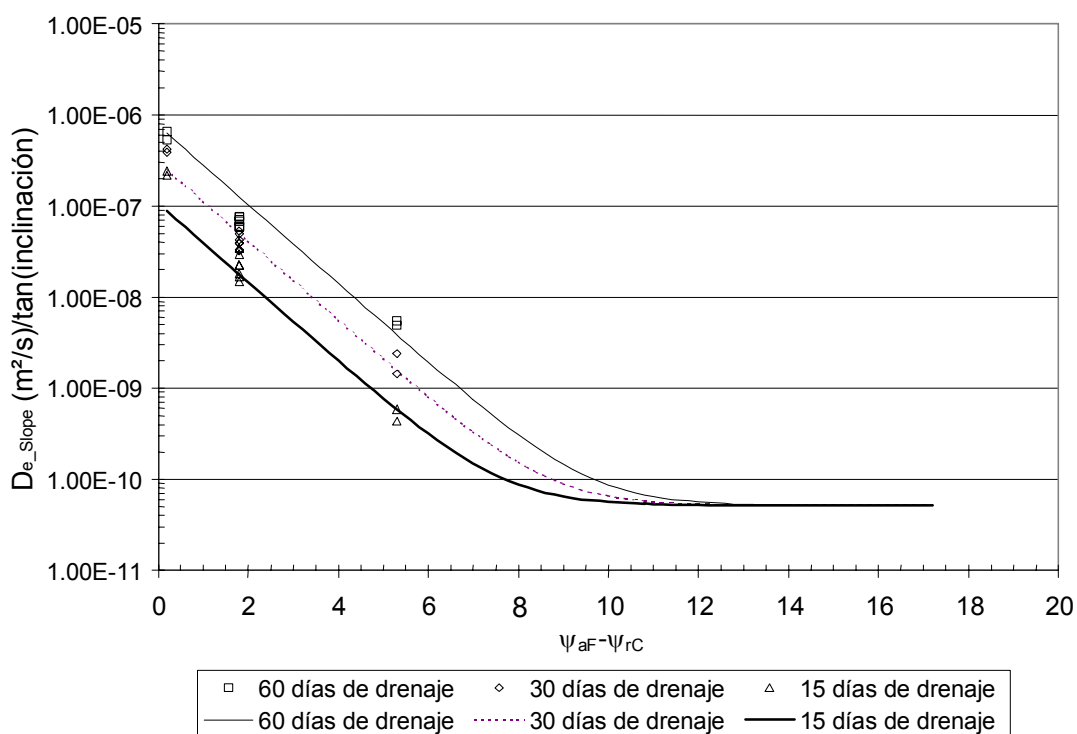
Para relacionar el efecto de la geometría con el desempeño de una CCBE utilizada para limitar la migración de gases por difusión, Bussiére et al. (2003a) propusieron un nuevo parámetro indicativo, el cual está basado en resultados numéricos y corresponde al promedio del coeficiente de difusión efectiva para la cobertura con pendiente (D_{e_Slope}). Primero se determina el valor del grado de saturación S_r (θ/n con $n=\theta_{sat}=0.44$) para cada nodo a profundidad media en la capa de retención de humedad; después, con estos valores S_r , se calcula el coeficiente de difusión efectiva equivalente utilizando ecuaciones de pronóstico (e.g., Millington y Shearer, 1971; Collin y Rasmuson, 1988;

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

Aachib et al., 2002). El parámetro D_{e_Slope} se utiliza aquí con propósitos indicativos para hacer posible la comparación de las diferentes configuraciones y las propiedades del material (pero no para los cálculos reales del flujo de oxígeno).

Luego es posible utilizar dichos resultados numéricos para cuantificar de manera relativa los efectos de las propiedades del material, tiempo de drenaje y geometría en el desempeño de una CCBE inclinada. Para representar los efectos de la barrera capilar en la cobertura se utiliza el término $(\psi_{aF}-\psi_{rC})$, donde ψ_{aF} es el valor de la entrada del aire del material de grano fino y ψ_{rC} es la succión residual para el material de grano grueso de la base (ambos expresados en m de agua). Este término, inicialmente propuesto por Nicholson et al. (1989) para evaluar el espesor de la capa de retención de humedad de una CCBE horizontal, también se puede utilizar para representar la capacidad de dichas capas para permanecer próximas a la saturación; un valor más alto $(\psi_{aF}-\psi_{rC})$ usualmente induce un mejor desempeño de la CCBE. El indicador de desempeño de la cobertura (expresada por el parámetro D_{e_Slope}) se normaliza por la inclinación de la pendiente (α). Bussière et al. (2003a) propusieron una relación entre las propiedades de los materiales de la cobertura $(\psi_{aF}-\psi_{rC})$, inclinación de la pendiente (α), tiempo de drenaje (t_D) y el desempeño relativo de la CCBE con declive para limitar la migración de gases (D_{e_Slope}); esta relación se representa gráficamente en la Figura 4-15.

Figura 4-15 Relaciones entre el Desempeño Normalizado y el Contraste de Retención de Agua



Relaciones entre el desempeño normalizado ($D_{e_Slope}/\tan(\alpha)$) y el contraste de retención de agua ($\psi_{aF}-\psi_{rC}$) de la barrera capilar con la integración de las condiciones del límite apropiadas (Bussière et al. 2003a).

Es importante señalar que las condiciones del límite han sido integradas en estas ecuaciones. El mejor desempeño de una CCBE está limitado a un valor D_{e_Slope} entre 10^{-9} y 10^{-10} m²/s, para ángulos de pendiente entre 1 y 20°. Dichos valores del límite más bajos corresponden al coeficiente de difusión efectiva de los suelos altamente saturados

(Eberling et al. 1994 y Mbonimpa et al. 2001, 2002) y se alcanzan asintóticamente para un valor ($D_{e_Slope}/\tan\alpha$) de 5.2×10^{-11} (véase la Figura 4-15). Sin embargo, cuando el contraste hidráulico entre los materiales de grano grueso y fino es débil (valores bajos de $\psi_{aF}-\psi_{rC}$ en la Figura 4-15), el valor D_{e_Slope} corresponde a un suelo con un grado de saturación relativamente bajo (entre 5×10^{-5} y 2.5×10^{-7} m²/s). En la Figura 4-15, dichas condiciones corresponden a ($D_{e_Slope}/\tan\alpha$) entre 9×10^{-8} y 8×10^{-7} m²/s.

La Figura 4-15 se considera válida para las siguientes condiciones específicas:

- La elevación y longitud de la cobertura con pendiente es suficiente para inducir un efecto de pendiente significativo (es decir, la variación de la elevación entre la parte más alta y la base de la pendiente debe ser mayor que ψ_{aF}).
- La superficie freática debe estar relativamente cerca a la superficie (profundidad menor de 3 m aproximadamente), similar a la observada con pozas de relaves ubicadas en áreas húmedas.
- Los factores climáticos y otros factores de degradación (tales como los ciclos de humidificación-deseccación y congelación-descongelación, intrusión de animales y raíces) no cambian las propiedades hidráulicas (tales como la WRC y la conductividad hidráulica) de los materiales.

Para ilustrar cómo puede utilizarse la relación propuesta en aplicaciones prácticas, consideremos una CCBE con una longitud de 50 m inclinada a 4:1, y hecha de dos materiales que tienen un contraste ($\psi_{aF}-\psi_{rC}$) de 1,5 m de agua. De la Figura 4-15, se estima el D_{e_Slope} como $5,1 \times 10^{-9}$ m²/s, $1,7 \times 10^{-8}$ m²/s y $4,3 \times 10^{-8}$ para periodos de drenaje de 15, 30 y 60 días, respectivamente. Si el objetivo del diseño es $D_e = 1 \times 10^{-8}$ m²/s, estos resultados demuestran que, para este caso en particular, la cobertura puede cumplir este criterio durante los primeros 15 días sin precipitación, pero posiblemente fallaría posteriormente. En este caso, puede ser que el diseño requiera algunas modificaciones (si los resultados se confirman mediante estudios más detallados), ya sea por medio del cambio de los materiales o mediante la incorporación de medidas de control contra la desaturación prematura (Bussièrre et al. 2000).

4.5 Otros factores de Influencia

Otros factores pueden influir en el comportamiento hidráulico de una CCBE y, en consecuencia, en su capacidad para reducir la migración del oxígeno. Entre ellos se pueden mencionar la evolución de las propiedades de los materiales debido a los efectos climáticos (ciclos de congelamiento-descongelamiento y/o humedad/sequedad), penetración de raíces, migración de partículas y el impacto de la estructura de los diques.

Es bien sabido que algunos materiales de grano fino, tales como la arcilla con alta plasticidad, pueden verse afectados por los ciclos de congelamiento/descongelamiento y humedad/sequedad. Se pueden encontrar muchas publicaciones acerca de la cuantificación de estos fenómenos sobre las propiedades del material (e.g., Hillel 1980; Benson et al. 1995; Newman et Wilson 1997); se han realizado trabajos específicos sobre materiales de cobertura afectados por efectos climáticos (e.g., Benson et Othman 1993; Daniel et Wu 1993). La susceptibilidad de los suelos arcillosos al agrietamiento debido a los ciclos de desecación y congelación-descongelación puede cambiar significativamente sus propiedades hidráulicas hasta en tres veces su valor en cuanto a la conductividad hidráulica saturada k_{sat} (e.g., Benson y Othman 1993; Chapuis 2002; Eigenbrod 2003). Aquí damos un ejemplo de los efectos de los ciclos de congelamiento/descongelamiento, donde se realizaron diferentes pruebas hidráulicas en un suelo arcilloso (pruebas de succión y pruebas de permeabilidad; Dagenais 2005). En

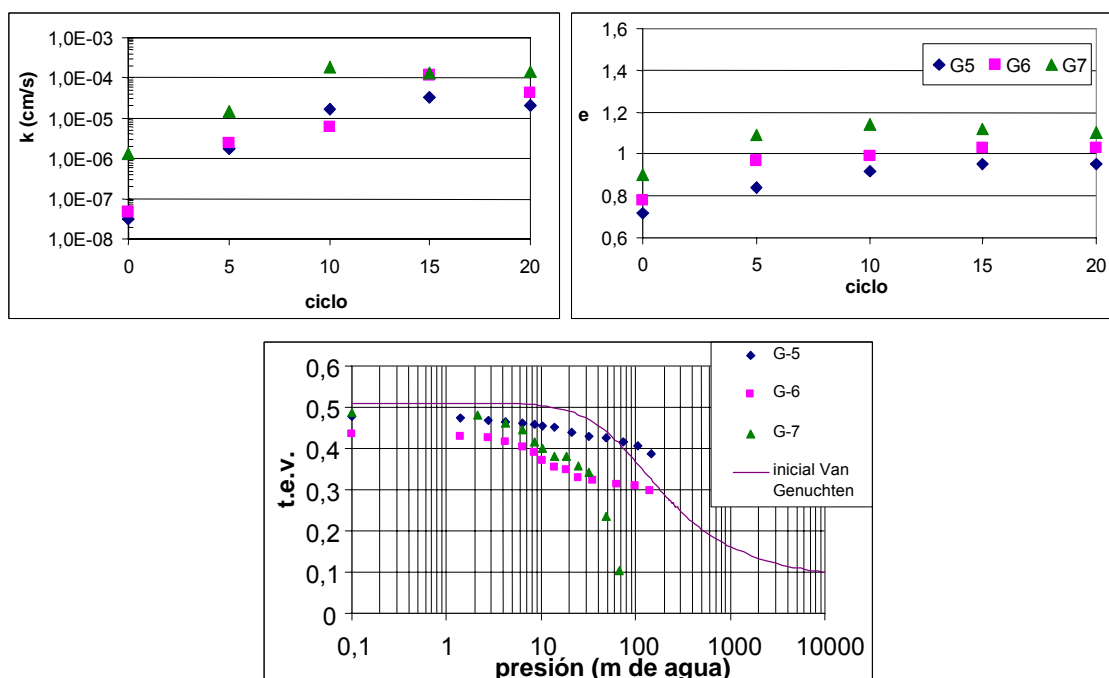
Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

la Tabla 4-5 se presentan las principales propiedades del material arcilloso probado y en la Figura 4-16 se presentan los resultados de la prueba hidráulica. Esta figura muestra que k_{sat} se incrementó en aproximadamente el triple y que la WRC es completamente diferente a la WRC inicial, después de 20 ciclos de congelación-descongelación. Durante estas pruebas también se observó un marcado incremento del índice de vacíos. Las grietas que se forman durante los ciclos de congelación-descongelación crean un suelo nuevo que tiene casi una WRC bimodal (las grietas drenan rápidamente, luego se presenta una planicie y la matriz empieza a drenar).

Tabla 4-5 Principales Propiedades de la Arcilla Sometida a Ciclos de Congelamiento/Descongelamiento (Dagenais 2005)

Propiedades	Inm-3
D ₁₀ (mm)	0,0002
D ₆₀ (mm)	0,005
D ₉₀ (mm)	0,16
% < 80 μm	87
C _u	25
G _s	2,79
w _l (%)	56,8
w _p (%)	24,6
I _p (%)	32,2
ρ _d max (kg/m ³)	1 687
w _{opt} (%)	20,5

Figura 4-16 Evolución de k_{sat} y e con Ciclos de Congelación-Descongelación



Evolución de k_{sat} y e con ciclos de congelación-descongelación (gráficos superiores) y la WRC después de 20 ciclos de congelación-descongelación de 3 muestras de arcilla (Dagenais 2005).

Estos resultados muestran la importancia de evaluar el impacto de los ciclos de congelación-descongelación y humedad-sequedad en las propiedades de los materiales

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

cuando una cobertura está hecha de suelos arcillosos. Si se cuenta con materiales con plasticidad menor (como los suelos limoníticos), éstos deben tener preferencia sobre los suelos arcillosos plásticos. Las principales ventajas de utilizar limos de baja plasticidad como una capa de retención de humedad están relacionadas con sus favorables propiedades hidrogeológicas (retención de agua y conductividad hidráulica) y con su potencial de restaurarse por sí solos (Aubertin et al. 1993, 1995; Eigenbrod 2003). Debido a la cohesión muy baja de algunos materiales limoníticos, las grietas que pueden originarse por los ciclos de congelación-descongelación y desecación tienden a cerrarse después de la infiltración del agua. El material puede entonces mantener o recuperar la mayor parte de sus propiedades hidrogeológicas iniciales.

Otro factor que puede afectar el desempeño de una CCBE es la presencia de raíces en la capa de retención de humedad. Estas raíces pueden afectar la integridad de la cobertura, incrementar la conductividad hidráulica y pueden también drenar la capa debido a la absorción de agua por parte de la planta (véase un ejemplo de penetración de raíces a través de una CCBE en la Figura 4-17). Esto puede reducir el grado de saturación y reducir la eficacia para limitar la migración del oxígeno; también puede tener efectos beneficiosos, tales como la reducción de la escorrentía y de la erosión. El diseño de una barrera contra raíces eficaz y de bajo costo no es una tarea sencilla (por ejemplo, Suter et al. 1993; Bowerman y Redente 1998). Probablemente ésta sea la razón por la que la mayoría de CCBE existentes no integran estas barreras contra raíces; en vez de eso, las compañías mineras eliminan los árboles regularmente utilizando herbicidas.

Figura 4-17 Ejemplo de Penetración de Raíces a través de la Capa Superior de una CCBE (Trépanier 2005)



Una CCBE utilizada para limitar la migración del oxígeno está basada en el contraste de las propiedades hidráulicas entre los materiales. Para obtener los efectos deseados de barrera capilar se coloca un suelo de grano fino entre dos materiales de grano grueso. Es posible que las partículas finas migren desde el material de grano fino hacia el suelo de grano grueso, modificando por consiguiente las propiedades hidráulicas del último. Para evitar este problema, es importante verificar si se están respetando los criterios de filtro (véanse mayores detalles sobre estos criterios en cualquier buen libro geotécnico, por ejemplo, McCarthy 1997). Debido a que la

gradiente hidráulica es baja en las coberturas, es posible que los criterios de filtro pronostiquen el movimiento de las partículas mientras que el modelamiento físico (prueba de columna) muestre lo contrario (ninguna migración de partículas finas). Por lo tanto se recomienda realizar dicho modelamiento físico con condiciones reales (tasa de precipitación, gradiente hidráulica) antes de la construcción.

Cuando las coberturas se construyen en diques, es importante verificar que la estructura interna del dique (e.g., el drenaje inferior) no afecte el flujo del agua en la capa de retención de humedad. En la Figura 4-18 se presenta un ejemplo del impacto del drenaje inferior en el comportamiento hidráulico de una CCBE. Esta figura muestra un acercamiento del modelo numérico en la base de la pendiente; el modelo numérico utilizado es similar al presentado en la Figura 4-9. Se aplicó una condición del límite de la parte superior representativa de las condiciones climáticas en la región de Abitibi, Québec, Canadá, durante los meses de mayo a agosto de 1997 y se realizaron análisis numéricos utilizando *SEEP/W* (véanse los detalles en Bussièrè 1999). Después de un periodo intenso de precipitaciones (finales de junio), un flujo significativo se presenta en la base del dique, el cual causa (para el drenaje inferior pequeño) la saturación de la capa de arena de la base de la cobertura (de la base hasta $y = 5$ m) y la desaparición de los efectos de la barrera capilar entre esta capa y la capa de retención de humedad; este fenómeno no se observa con un drenaje inferior más grande (véase la Figura 4-18). El grado de saturación en la profundidad media de la capa de retención de humedad se reduce en aproximadamente 72% para el drenaje inferior pequeño, mientras que permanece para valores mayores de 88% para el drenaje inferior grande (véase la Figura 4-18). Este ejemplo muestra que el desempeño de una CCBE para limitar la migración del oxígeno puede verse significativamente afectada por la estructura interna del dique; por lo que es importante tener un buen conocimiento de la estructura del dique antes de diseñar y construir una CCBE en un dique existente.

4.6 Metodología para el Diseño

En las secciones anteriores se mostraron los factores principales que afectan el desempeño de una CCBE para limitar la migración del oxígeno. A continuación presentamos la metodología propuesta por Aubertin et al. (2002) para el diseño de un sistema de cobertura eficaz para la limitación del oxígeno.

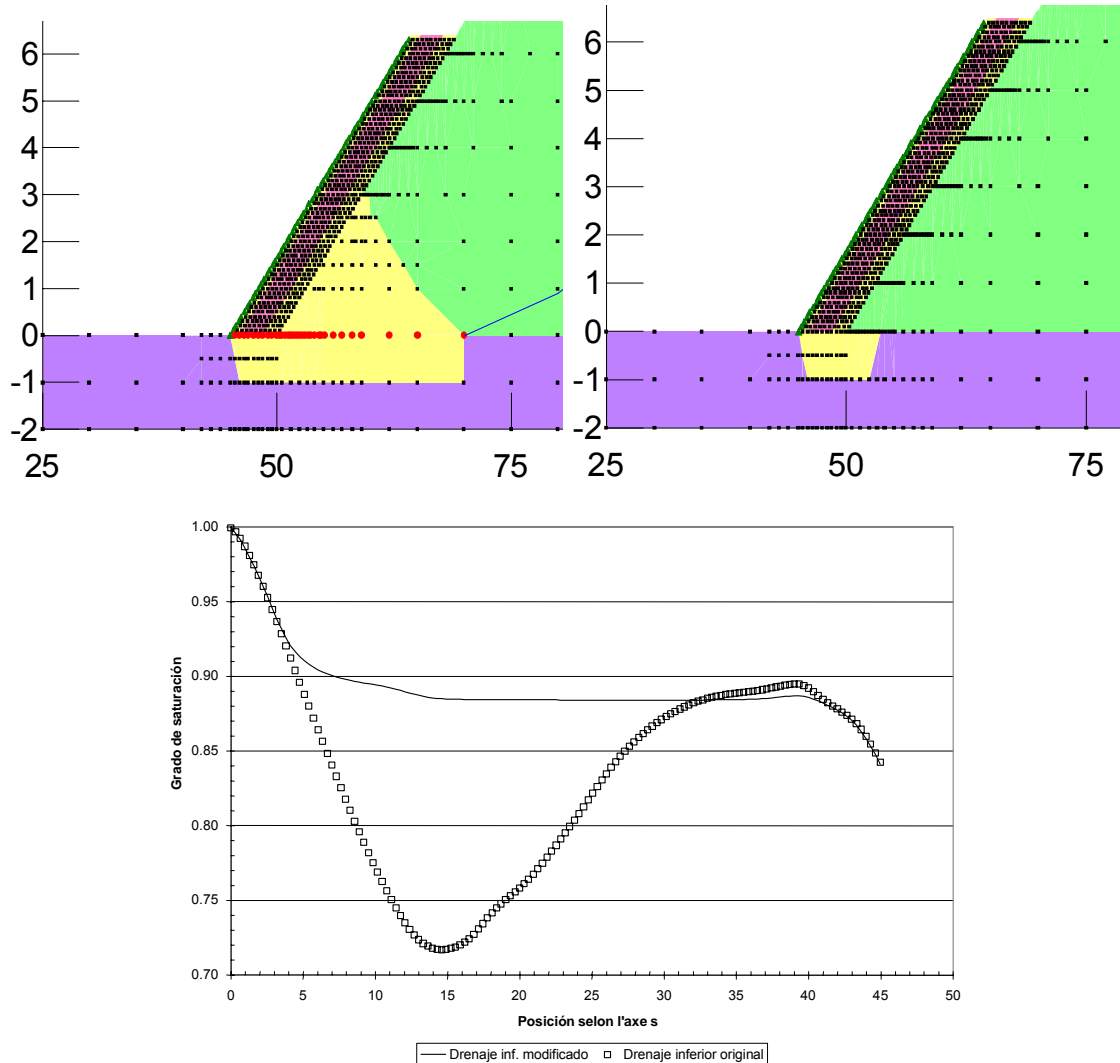
La metodología propuesta por Aubertin et al. (2002) se puede subdividir en 8 pasos:

1. Caracterización de los materiales de la cobertura
2. Recolección de información climática y ecológica
3. Evaluación preliminar
4. Modelamiento numérico
5. Modelamiento físico de laboratorio
6. Diseños de prueba in situ
7. Diseño final
8. Construcción y monitoreo a largo plazo

En la Figura 4-19 se presenta un diagrama de bloques que representa los diferentes pasos que conducen al diseño final de una cobertura CCBE.

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

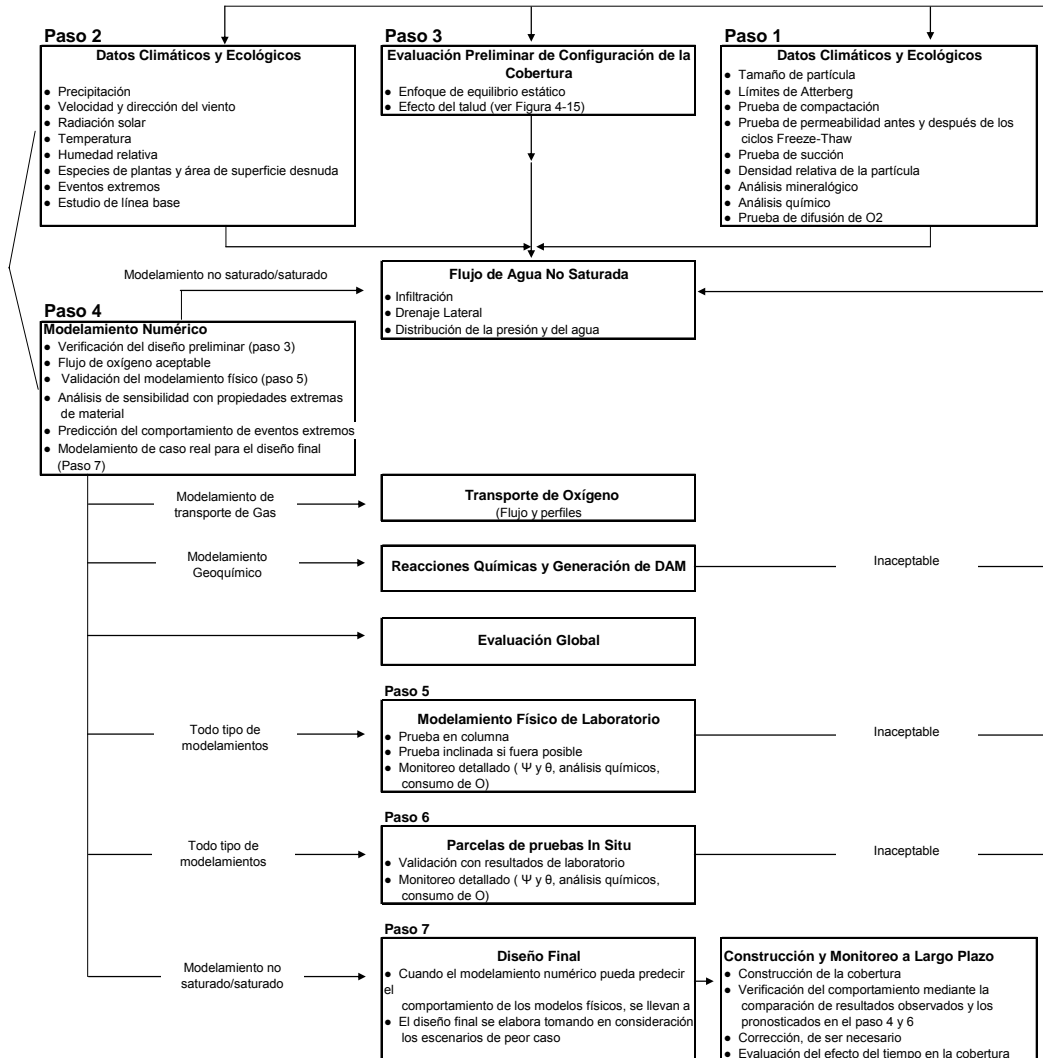
Figura 4-18 Acercamiento del Drenaje Inferior de los Diques Estudiados



Acercamiento del drenaje inferior de los diques estudiados (drenaje inferior grande: gráfico superior de la izquierda; drenaje inferior pequeño: gráfico superior de la derecha) y grado de saturación a profundidad media de la capa de retención de humedad (0 = base de la pendiente) en ambos casos (cuadrado = drenaje inferior pequeño, línea = drenaje inferior grande) durante un periodo de lluvias (Bussièrè 1999).

Coberturas con Efectos de Barrera Capilar

Figura 4-19 Diagrama para el Diseño de una CCBE (inspirado en Aubertin et al. 2002)



4.6.1 Caracterización de los Materiales de la Cobertura – Paso 1

Como se vio anteriormente, las propiedades de los materiales de la cobertura tendrán un impacto directo en la capacidad de la cobertura para desempeñarse como una barrera contra oxígeno. Las propiedades físicas que deben evaluarse para cada material son la distribución del tamaño del grano, densidad relativa de los granos (D_r), límites de Atterberg (si fuera pertinente), propiedades de compactación, conductividad hidráulica saturada (k_{sat}) y las propiedades no saturadas (curvas de retención de agua y función de permeabilidad). Para los cinco primeros parámetros se cuentan con métodos estándar (ASTM D422-63, ASTM D854-58, ASTM D4318-84, D1557-78, ASTM D5856, respectivamente). La distribución del tamaño de grano, densidad relativa de los granos, los límites de Atterberg y las propiedades de compactación son especialmente importantes en la fase de construcción; estos parámetros se suelen utilizar para el control de calidad. Las propiedades no saturadas también son muy

importantes para el diseño de una cobertura CCBE, las cuales incluyen el modelamiento del flujo no saturado. Se puede evaluar la WRC de los suelos utilizando diferentes enfoques, tales como el aparato de placa de presión (que se adapta bien en suelos que tienen un valor de la entrada del aire mayor de 50 cm de agua) y columnas con instrumentos (bastante adecuadas para suelos de grano grueso). También se pueden utilizar otras técnicas (mencionadas en el Capítulo 2). Las funciones de permeabilidad (k_u) se estiman usualmente con métodos teóricos, tales como los presentados en el Capítulo 2 (por ejemplo, Mualem 1976; Fredlund et al., 1994). En la etapa de prefactibilidad de un proyecto, donde sólo se tiene información limitada (por ejemplo, la distribución del tamaño de grano de los diferentes materiales disponibles cerca del sitio a rehabilitar) se pueden utilizar funciones de pedotransferencia para estimar las propiedades hidráulicas (k_{sat} , WRC y k_u). Usualmente estas funciones sólo necesitan poca información para hacer un pronóstico de las propiedades hidráulicas (por ejemplo, consúltese Mbonimpa et al. 2002; Fredlund et al. 1994; Chapuis y Montour 1992; Tiejie y Hennings 1996; Vuković y Soro 1992 para ver las funciones utilizadas para pronosticar k_{sat} y Aubertin et al. 2003; Vereecken et al. 1992; Wösten et al. 2001 para las funciones utilizadas para pronosticar la WRC). Sin embargo, esto no quiere decir que las ecuaciones de pronóstico remplazan la prueba con muestras representativas.

También es esencial una caracterización química-mineralógica del residuo de la mina para el diseño de una CCBE. Resulta de suma importancia el conocimiento de la mineralogía para lograr buenos pronósticos geoquímicos con herramientas numéricas. Se recomienda llevar a cabo análisis de difracción de rayos-X (XRD) con una cuantificación de las fases del mineral identificadas por el método Rietveld (Rietveld, 1993; Taylor y Hinczak, 2001). Las observaciones SEM en muestras representativas pueden ayudar a precisar algunos detalles mineralógicos. También es importante el análisis químico total (mediante la técnica ICP-AES); estos análisis complementan el estudio mineralógico.

4.6.2 Recolección de Información Climática – Paso 2

Como se vio en las secciones anteriores de este capítulo, la información climática tiene un impacto significativo en el desempeño de una cobertura CCBE. En la etapa de diseño es esencial recolectar información climática típica del sitio. Se debe identificar un año seco típico para una evaluación del desempeño a largo plazo; también es importante evaluar una respuesta a corto plazo de la cobertura después de un periodo seco prolongado, con diferentes tasas de precipitación.

Contrariamente a la cobertura SDR, la evaporación no es parte del funcionamiento de una cobertura. Para una CCBE utilizada como una barrera contra oxígeno, el efecto de evaporación puede ser perjudicial para el desempeño de la cobertura. Se suele considerar, según las observaciones in situ y los resultados del modelamiento numérico, que una capa de retención de humedad protegida por una capa de grano grueso (típicamente 30 cm de arena o arena y grava; Dagenais 2005) no es afectada significativamente por la evaporación. Sin embargo, para un mejor entendimiento de los diferentes componentes de un presupuesto de agua de la cobertura es recomendable recolectar información climática que pueda integrarse a las herramientas numéricas para estimar la evaporación; estos parámetros son la temperatura, velocidad y dirección del viento, radiación solar, humedad del aire y precipitación (véanse los detalles en el Capítulo 5).

4.6.3 Evaluación Preliminar– Paso 3

Es posible evaluar de manera preliminar el espesor de la cobertura utilizando la WRC de los materiales, y asumiendo que prevalecen las condiciones de equilibrio estático (un peor escenario, ya que ignora los efectos de la barrera capilar). Este método consiste en calcular la succión en una ubicación z ($z=0$ en la superficie freática) como equivalente a la distancia desde la superficie freática (por ejemplo a una distancia z de 2 m, la succión equivale a 2 m de agua). Luego se estima el perfil del contenido volumétrico en la capa de retención de humedad (se ignoran las dos capas de arena ya que no tienen un impacto significativo en el flujo de difusión debido a sus bajos valores S_r ; Aachib et al., 1993; Mbonimpa et al., 2003) tomando el valor θ correspondiente a cada valor ψ en la WRC del material. Luego se puede producir un perfil del contenido volumétrico de agua (o grado de saturación S_r cuando se asume un valor n de porosidad; $S_r = \theta/n$) en equilibrio, desde el cual se puede calcular el coeficiente de difusión efectiva D_e (utilizando por ejemplo la Ecuación 2.15 en el Capítulo 2). Finalmente se calcula el flujo de oxígeno continuo utilizando diferentes espesores de la capa de retención de humedad y la primera ley de Fick para condiciones continuas (véase la Ecuación 2.14 en el Capítulo 2). En esta etapa, el objetivo puede ser alcanzar flujos de oxígeno similares a los medidos para coberturas de agua (usualmente entre 1 y 8 mol/m²/año; Li et al. 2000). El modelamiento geoquímico precisará posteriormente este flujo de oxígeno aceptable.

En esta etapa también es importante verificar si la geometría del sitio puede afectar el desempeño de la cobertura utilizando la Figura 4-15. Los criterios preliminares D_e propuestos son los únicos a un grado de saturación de 85% ($D_e \approx 10^{-8}$ m²/s); para valores S_r mayores de 85%, la fase de aire se considera discontinua y el flujo de oxígeno está limitado por la difusión en el agua y por la concentración máxima de O₂ disuelto (Corey, 1957; Mbonimpa et al., 2003). Si no se pueden cumplir los criterios para un periodo de drenaje extremo (e.g., 60 días), se deben desarrollar cálculos más sofisticados utilizando el modelamiento de flujo.

4.6.4 Modelamiento Numérico –Paso 4

Este paso consiste en perfeccionar la configuración de la cobertura mediante el modelamiento numérico. La primera fase consiste en calcular el flujo de oxígeno aceptable que permitirá que la cobertura cumpla con los criterios ambientales en el efluente final. Esto se suele evaluar utilizando modelos geoquímicos tales como *RATAP* (SENES y Beak 1986, 1988; modelo usado para el sitio LTA), *WATAIL* (Scharer et al., 1993; modelo usado para el sitio Lorraine) y *MIN3P* (Mayer et al. 2002). Estos modelos tienen diferentes niveles de complejidad, pero el *MIN3P* está considerado como el más complejo porque puede simular flujos saturados-no saturados y puede integrar ecuaciones para el transporte advectivo-dispersivo de múltiples componentes de fase disuelta, entre las que se encuentran el transporte de gas difusivo y términos de reacciones tipo fuente-colector (de la precipitación y disolución del mineral, intercambio de fases, etc.) En la Figura 4-19 se presentan dos ejemplos de modelamiento con *MIN3P*: en el primer caso son relaves que generan ácido cubiertos sólo con una capa protectora de arena y en el segundo caso son los mismos relaves cubiertos con una CCBE. La Figura 4-19 presenta el comportamiento hidráulico y geoquímico de los dos casos durante los primeros 1 200 días. Este tipo de resultados de modelamiento unidimensional pueden utilizarse para identificar la eficacia requerida por la cobertura en cuanto al flujo de oxígeno para alcanzar el objetivo de calidad del agua.

Sin embargo, estos tipos de modelos son complejos, usualmente unidimensionales y toman bastante tiempo. Para perfeccionar el diseño e integrar otros aspectos tales como la geometría y la interacción suelo-atmósfera se realiza el modelamiento de flujo no saturado. Ahora ya se tiene el desempeño planificado en cuanto al grado de saturación gracias a la etapa previa de modelamiento geoquímico. Las propiedades del suelo no saturado evaluadas en el laboratorio (para valores de porosidad similares a los esperados en el campo) se integran a los modelos numéricos, así como las condiciones climáticas típicas y críticas (condiciones de corto y largo plazo) y la información acerca de la vegetación (si fuera pertinente). Se debe realizar un estudio numérico paramétrico para optimizar el espesor de las capas. En la etapa de diseño se debe evaluar la variabilidad de las propiedades del suelo y se debe utilizar las propiedades del peor caso. Para las coberturas CCBE se pueden utilizar diferentes códigos numéricos; los códigos más conocidos que pueden simular un flujo no saturado bidimensional son *Hydrus 2D* (Simunek et al. 1999), *Seep/W* y *Vadose/W* (Geoslope International 2006) y *SVFlux* (Soil Vision Systems Ltd 2005). Como en la cobertura SDR, es crucial analizar de manera distinta las partes planas e inclinadas de un sitio cuando se diseña una cobertura CCBE. Como se vio previamente en este capítulo, el comportamiento hidráulico puede ser completamente diferente debido a los efectos geométricos.

4.6.5 Modelamiento Físico de Laboratorio – Paso 5

Después de los análisis numéricos, es esencial validar los resultados numéricos utilizando condiciones controladas. Con este fin, se pueden usar modelos físicos tales como columnas con instrumentos para los sistemas de CCBE instalados en una superficie plana. Para estudiar el comportamiento hidrogeológico y geoquímico de los sistemas de capas se utilizan pruebas de columna combinadas con simulaciones numéricas unidimensionales. La eficacia de estos sistemas para limitar la generación de DAM se evalúa haciendo una comparación de las columnas de control (donde los relaves reactivos fueron cubiertos con un sistema de capas) con una columna de referencia que contiene sólo relaves reactivos (Aubertin et al. 1995, 1997; Achib et al. 1998). La Figura 4-20 presenta un ejemplo de un laboratorio experimental preparado y de resultados típicos hidráulicos y geoquímicos.

Se pueden estudiar diferentes variables en esas columnas, tales como la duración de un periodo seco en las distribuciones de la humedad y de la presión en las capas y consecuentemente en el flujo de oxígeno. Las columnas se suelen colocar en el laboratorio y tratan de simular condiciones reales: posición de la superficie freática, tasa de precipitación y configuración de la cobertura. La información obtenida de estos experimentos debe estar bien correlacionada con los resultados del modelamiento de flujo no saturado. De no ser así, se debe realizar un análisis integral de los resultados físicos y numéricos para comprender las discrepancias entre ambos. Los modelos físicos de laboratorio también pueden utilizarse para evaluar el impacto de la pendiente en el comportamiento hidráulico de la CCBE. Sin embargo, debido a la complejidad de dicho modelo, se suelen utilizar análisis numéricos para dicho propósito.

4.6.6 Diseños de Prueba In Situ – Paso 6

Los modelos físicos de laboratorio son útiles para lograr una mejor comprensión de los fenómenos involucrados y para validar las herramientas de modelamiento, pero no ofrecen necesariamente soluciones prácticas para aplicaciones de campo. Esa es la razón por la que se recomienda construir diseños de prueba a escala intermedia in situ

que permitan evaluar el desempeño de la CCBE a una escala mayor y en condiciones más reales. Se han realizado algunos estudios *in situ* en condiciones bien controladas a escala intermedia (Yanful *et al.* 1993a, b; Woyshner y Yanful 1995; Bussièrre y Aubertin 1999; Chtaini *et al.*, 2001). Usualmente estos diseños de prueba experimental se construyen para comparar diversos escenarios de cobertura y para identificar cómo sería el comportamiento de los diversos sistemas de cobertura en condiciones reales. Nuevamente, los resultados de estos diseños de prueba experimental pueden utilizarse para validar las herramientas numéricas y para perfeccionar la configuración final de la cobertura.

En la bibliografía relacionada con el tema se pueden encontrar dos tipos principales de diseños de prueba *in situ*: diseños de prueba aisladas (por ejemplo, Bussièrre y Aubertin 1999) y diseños de prueba construidos directamente en el residuo de la mina (por ejemplo, Woyshner y Yanful 1995; Chtaini *et al.* 2001). La ventaja principal del primer tipo es que se pueden monitorear todos los parámetros del sistema (calidad y cantidad de agua, almacenamiento de agua, etc.) mientras que el otro método está principalmente enfocado en el comportamiento hidráulico de la cobertura (la información química del agua no puede utilizarse para interpretar el comportamiento de la cobertura). En la Figura 4-21 se presenta un ejemplo de un tipo aislado de celda experimental (véanse más detalles en Bussièrre y Aubertin 1999 y Aubertin *et al.* 1999).

4.6.7 Diseño final, Construcción y Monitoreo a Largo Plazo – Pasos 7 y 8

Una vez que se han analizado todas las características e influencias de la cobertura se construye el diseño final. Se utiliza un modelo numérico para visualizar el caso real y para pronosticar el comportamiento de la cobertura en condiciones típicas y extremas. La cobertura se puede construir una vez que el diseño sea aceptable.

Después de la etapa de construcción, se deben colocar instrumentos en la cobertura y ésta debe ser monitoreada; se debe realizar también una comparación entre los resultados pronosticados y los resultados medidos (Paso 8). El modelo numérico utilizado en la etapa de diseño se evalúa y se recalibra el modelo si fuera necesario. El monitoreo también permite identificar cualquier cambio significativo de largo plazo en cuanto a la eficacia de la cobertura para limitar la infiltración del agua. Si el desempeño de la cobertura se ve afectado significativamente por el tiempo, se deberán tomar medidas en el sitio de la mina. Entre los factores que pueden afectar el desempeño de una cobertura con barrera contra oxígeno se pueden encontrar los siguientes: biointrusión, efectos de congelación-descongelación, efectos geométricos en la tasa de evaporación real, agrietamiento por desecación y erosión acuática y eólica. Debido a que estos factores pueden tener un impacto en la capacidad de la cobertura para limitar la infiltración de agua, se debe añadir un factor de seguridad al diseño final de la cobertura. No obstante, en la literatura no se proponen criterios claros sobre este tema.

4.7 Comentarios Finales

En las secciones anteriores se presentaron brevemente los principales conceptos existentes detrás de las barreras contra oxígeno que utilizan efectos de barrera capilar (cobertura CCBE) para impedir la migración del oxígeno de la atmósfera a los relaves que generan ácido. Se identificaron los principales factores de influencia y se propuso una metodología para el diseño de una cobertura CCBE eficaz. Para evaluar la calidad

de una propuesta para el diseño de una CCBE, se deben considerar los siguientes puntos en el informe:

- la justificación del objetivo del desempeño (flujo de oxígeno planificado) del sistema de cobertura;
- las principales propiedades hidrogeotécnicas (para condiciones representativas) de los materiales utilizados en los sistemas de cobertura y las principales características geotécnicas y geoquímicas de los relaves cubiertos;
- información climática (condiciones promedio y extremas) y acerca de la vegetación;
- una descripción del modelamiento físico (en el laboratorio y en el campo) utilizado para verificar el diseño y para calibrar los modelos numéricos;
- los principales resultados geoquímicos e hidrogeológicos del modelamiento físico;
- el efecto de inclinación en el desempeño si una parte de la cobertura está construida en una superficie inclinada;
- el diseño final basado en los resultados del modelamiento numérico (modelo previamente validado con la fase de modelamiento físico) con condiciones climáticas extremas y peor escenario en cuanto a las propiedades del material;
- un análisis de otros aspectos que pueden afectar el desempeño a largo plazo del sistema de cobertura, tales como los ciclos de congelación-descongelación, desecación, vegetación, estructura de drenaje existente, erosión acuática y eólica y otros; y
- una estrategia de monitoreo para verificar si se han cumplido los objetivos en cuanto a la migración del oxígeno a través del sistema de cobertura.

5 INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO

5.1 Parámetros Fundamentales

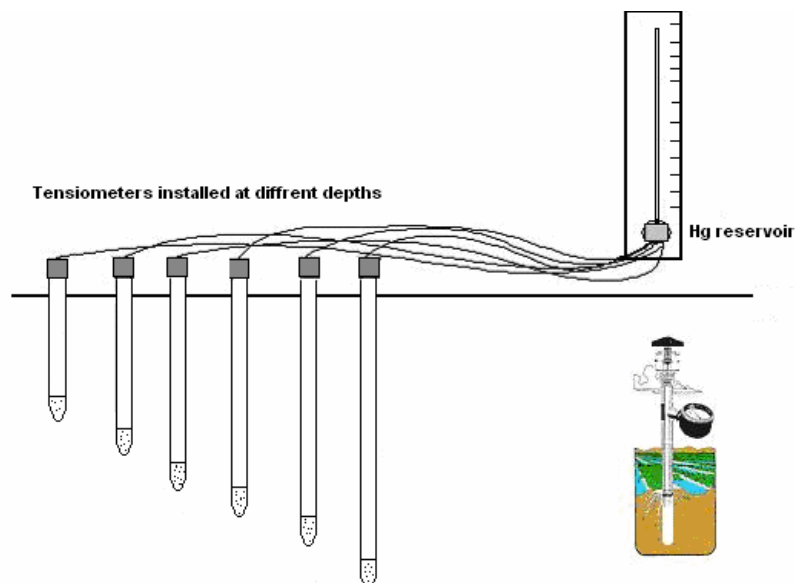
Se debe ampliar la información sobre las diferentes estrategias de monitoreo a fin de evaluar la capacidad de las coberturas de residuos mineros para inhibir la producción de drenaje ácido de mina antes de su construcción. En esta etapa es importante elegir los parámetros apropiados que serán monitoreados y, por consiguiente, el tipo de instrumentos que se instalará en las coberturas. Los principales parámetros que se monitorearán en ambos tipos de coberturas (coberturas con efectos de barrera capilar (CCBE) o coberturas de almacenamiento, desviación y descarga (SDR)) son: succión matricial, contenido volumétrico de agua, flujo de oxígeno, parámetros meteorológicos y flujo y calidad de agua. En este capítulo se presentan diferentes técnicas para medir estos parámetros, así como una breve evaluación de cada técnica. Para cada método se presenta una breve descripción junto con sus principales ventajas y desventajas.

5.2 Medición de la Succión

5.2.1 Tensiómetros

El tensiómetro es un dispositivo simple que consiste en un tubo de plástico con una punta hueca de cerámica llena de agua desionizada recién hervida y posteriormente enfriada. El dispositivo se sella herméticamente con un tapón y se conecta a un medidor de presión mediante un tubo capilar (véase la Figura 5-1). El equilibrio se alcanza entre el suelo que rodea la punta de cerámica y la succión se transmite al medidor de presión, el cual suele ser un manómetro de mercurio o un transductor de presión. Si la humedad del campo gotea, el agua se difunde a través de la punta de cerámica porosa al medio circundante; después se forma una depresión dentro del sistema, el cual se mide con el medidor de presión. Del mismo modo, cuando el suelo se vuelve a humedecer la gradiente de tensión se reduce y el agua fluye hacia la punta de cerámica.

Figura 5-1 Tensiómetro Esquemático Instalado para Medir la Succión del Suelo



Fuente: www.sols-mesures.com

Ventajas: Mediciones directas, el radio de la medición se puede extender hasta 10 cm, lectura continua posible, no se requiere ninguna fuente de energía, la salinidad del suelo no lo afecta, costo relativamente bajo.

Desventajas: rango limitado de medición (menos de 100 kPa), respuesta relativa lenta debido al equilibrio de tiempo entre la cubeta y el suelo, se necesita un buen grado de contacto entre el dispositivo y el suelo, requiere mantenimiento frecuente en climas cálidos y secos, debe estar protegido contra los ciclos de congelación-descongelación (lleno de alcohol antes del invierno).

5.2.2 Bloque de Resistencia Eléctrica

Se puede emplear la resistencia eléctrica entre electrodos para evaluar la presión del agua del suelo. Cuando se incorporan dos electrodos en un medio poroso (bloque), se crea una resistencia eléctrica entre ellos, la cual es proporcional al contenido de agua del medio. Este contenido de agua está relacionado directamente con la succión matricial del suelo. La resistencia eléctrica disminuye a medida que el medio y el bloque se secan. Esta técnica ha sido utilizada por más de 60 años (e.g., Bouyoucos y Mick, 1940). En el siguiente párrafo se presentan dos tipos de aparatos de resistencia eléctrica: el bloque de yeso y el sensor de matriz granular.

5.2.3 Bloques de Yeso

El bloque de yeso está compuesto de una celda electroquímica con una solución saturada con sulfato de calcio. La resistencia eléctrica entre los electrodos (incorporados en el bloque) está dada por la aplicación de una pequeña cantidad de tensión mediante un puente de Wheatstone (de este modo se evita la polarización del bloque – véase la Figura 5-2). Las variaciones de la conductividad eléctrica del suelo podrían afectar las mediciones; es por ello que se utiliza el yeso como un amortiguador contra las variaciones de la salinidad del suelo (hasta cierto nivel). Un problema inherente es que el bloque de yeso se disuelve lentamente con el tiempo, con lo que se pierden las propiedades de calibración (este efecto se observa principalmente en los suelos salinos). El pH y las condiciones del agua del suelo afectan la tasa de disolución del bloque de yeso; además, las variaciones de temperatura afectan las mediciones por lo que debe aplicarse un factor de corrección. El límite más bajo de medición es de 30 kPa (Bourget et al. 1958), mientras que el límite más alto es de 1000 kPa (Tanner et al. 1948; Bourget et al. 1958).

Ventajas: El radio de medición se extiende hasta 10 cm, no se requiere mantenimiento, es sencillo y no es costoso.

Desventajas: Tiene un uso limitado en la investigación de campo debido a su débil resolución, no se recomienda en suelos saturados (de 0 a 30 kPa), el tiempo afecta las propiedades del bloque de yeso, poco equilibrio con el suelo, no se recomienda para suelos arenosos debido a que el agua drena muy rápido y no se puede equilibrar el instrumento, no es apropiado para suelos hinchados, el efecto de histéresis y las variaciones de temperatura afectan al bloque de yeso.

Figura 5-2 Bloque de Yeso y Aparatos de Medición



Fuente: www.sowacs.com

5.2.4 Sensor de Matriz Granular o Bloques Watermark

El sensor de matriz granular (SMG) está compuesto de dos electrodos incrustados en un material de referencia de matriz, el cual está rodeado por una membrana sintética porosa y por una malla protectora de acero inoxidable (Véase la Figura 5-3). El movimiento del agua entre el suelo y el sensor produce cambios en la resistencia eléctrica entre los electrodos y el sensor; luego la resistencia eléctrica se puede convertir en potencial de agua del suelo. Los sensores de matriz granular pueden medir las succiones cercanas a la saturación del suelo, siendo el rango de medición entre 2 y 200 kPa, con mediciones más precisas para valores de succión mayores a 8 kPa (Thomson y Armstrong 1987; Spaans y Baker 1992; Shock et al. 1999, 2002; Aubertin et al. 1999).

Figura 5-3 Sensor de Matriz Granular y su Medidor Digital (Tipo Watermark)



Fuente: www.irrometer.com

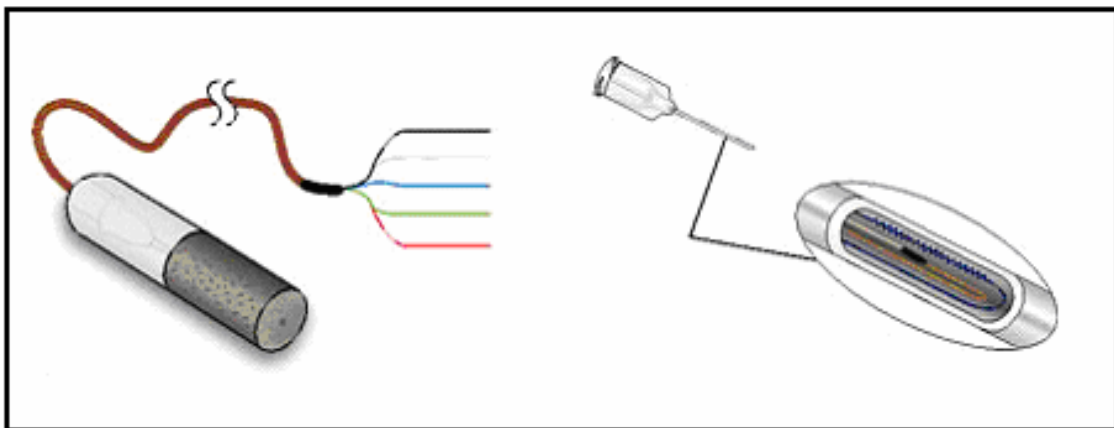
Ventajas: Se solucionan los problemas del bloque de yeso, el radio de medición se extiende hasta 10 cm, no se requiere mantenimiento, es sencillo y no es costoso.

Desventajas: Tiempo de reacción largo, no se adapta para mediciones precisas en suelos arenosos debido que estos tienen un drenaje rápido, no se adapta a suelos arcillosos, se necesita reinstalar la sonda cuando el suelo se vuelve muy seco, la salinidad del suelo lo afecta.

5.2.5 Sensor de Disipación de Calor

La conductividad térmica del agua produce disipación del calor (un material seco se calienta más rápido que un material húmedo). La transferencia de calor en un medio poroso es proporcional a su contenido de agua. Un sensor de disipación de calor está compuesto de un bloque poroso que contiene una fuente de calor y un sensor de temperatura de precisión (Shaw y Baver 1939 - véase la Figura 5-4). La temperatura del bloque se mide antes y después del encendido de la fuente de calor durante algunos segundos; el contenido de agua del bloque se obtiene de la variación de la temperatura (Muñoz-Carpena 2004). Cuando el bloque poroso se pone en contacto con el suelo y alcanza el equilibrio con el agua del suelo, su curva de retención de agua dará la succión matricial del suelo (Fredlund 1992), por lo que deberá calibrarse la sonda antes de su utilización. El rango de medición se encuentra entre 10 y 1000 kPa, con una presión más baja entre 100 y 1000 kPa. Este método ha sido empleado por más de 30 años en estudios ambientales y en la agricultura (Dan y Topp 2002).

Figura 5-4 Fotografía y Descripción Detallada del Sensor de Disipación de Calor



Fuente: www.campbellsci.com

Ventajas: El rango de medición se encuentra entre 10 y 1,000 kPa, no requiere mantenimiento, radio de medición hasta de 10 cm, posibilidad de registro de las mediciones, la salinidad del suelo no lo afecta.

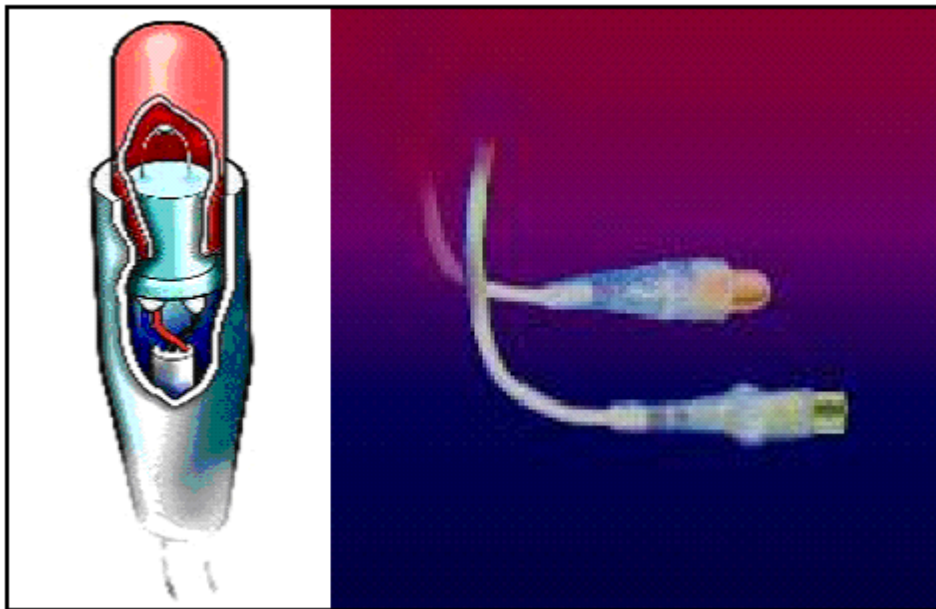
Desventajas: Se necesita un controlador sofisticado para controlar las operaciones de calentamiento y para las mediciones, tiempo de reacción largo (algunas horas para una succión entre 10 y 50 kPa y hasta alrededor de 1 semana para una succión de 500 kPa, no se recomienda para suelos arenosos, consumo significativo de energía en caso de mediciones frecuentes.

5.2.6 Sicrómetro de Suelo

El método del sicrómetro fue presentado por primera vez por Spanner (1951) y desde entonces ha sido ampliamente utilizado para medir la succión total (por ejemplo,

Rawlins y Dalton 1967; Campbell y Gardner 1971; Hamilton et al. 1981; Madsen et al. 1986; Zerhouni 1995; Gee y Ward 2000; Agus y Schanz 2005). Esta técnica se basa en los equilibrios térmicos y de vapor entre el suelo y el espacio de vapor. En condiciones de equilibrio de vapor, el potencial de agua de un ambiente poroso está directamente relacionado con su presión de vapor del aire. Por lo tanto se puede determinar la succión matricial del suelo midiendo la humedad relativa de un espacio dentro de una celda porosa, la cual está en equilibrio con la solución del suelo (Campbell y Gardner 1971). Un sicrómetro está compuesto de una cámara de aire hecha de cerámica o un tamiz donde se coloca un termopar (Muñoz-Carpena 2004 - véase la Figura 5-5). La humedad relativa en la cámara de aire se calcula de la diferencia de temperatura entre el bulbo del termopar húmedo y seco. El rango de las mediciones de succión se encuentra entre 50 y 3000 kPa, con una precisión más baja entre 1000 y 3000 kPa.

Figura 5-5 Sensor del Sicrómetro



Fuente: www.wescor.com

Ventajas: Alta precisión (excepto en rangos próximos a la saturación del suelo), se adapta a condiciones de baja humedad.

Desventajas: No se recomienda para profundidades de suelo bajas, radio pequeño de medición, el tiempo para alcanzar el equilibrio es de alrededor de una hora, no es apropiado para succiones cercanas a la saturación, se necesita equipo especializado para la energización y lectura de la sonda.

5.2.7 Potenciómetro WP4

El WP4 mide el potencial de agua de una muestra mediante la determinación de la humedad relativa del aire sobre la muestra en una cámara cerrada. Asumiendo un equilibrio de temperatura, la humedad relativa está directamente en función del potencial de agua (ICT.2005- véase la Figura 5-6). En el WP4 se pone una muestra en una cubeta para muestras sellada contra un bloque sensor, dentro del cual se colocan un ventilador, un sensor de saturación, un sensor de temperatura y un termómetro infrarrojo. El sensor de saturación mide la temperatura de saturación del aire y el

termómetro infrarrojo mide la temperatura de la muestra. El objetivo del ventilador es acelerar el equilibrio y controlar la conductancia de la capa del límite del sensor de saturación (ICT 2005). Con estas mediciones se calcula la presión de vapor del aire en el espacio superior como la presión de vapor en saturación a la temperatura de saturación. Cuando el potencial de agua de la muestra y el aire en el espacio superior estén en equilibrio, la medición de la presión de vapor en el espacio superior y la temperatura de la muestra (con lo que se calcula la presión de vapor en saturación) proporcionan el potencial de agua de la muestra.

Figura 5-6 Potenciómetro WP4 de Precisión Milimétrica DW4



Fuente: www.sols-mesures.com

Ventajas: Mediciones rápidas y fáciles, amplio rango de medición hasta 40 MPa, requiere bajo volumen de muestreo (15 a 7 ml)

Desventajas: Medición destructiva (se necesita una nueva muestra para cada medición), es necesario adquirir una cubeta para muestras, la precisión es de aproximadamente 100 kPa.

5.2.8 Equitensiómetro EQ2

El equitensiómetro EQ2 (véase la Figura 5-7) emplea una nueva técnica para medir la succión matricial del suelo. Este equipo deduce la succión matricial del suelo con las mediciones del contenido de agua hechas por el ThetaProbe (esta sonda permite medir el contenido volumétrico de agua; en la siguiente sección se proporcionan más detalles al respecto). El equitensiómetro EQ2 está compuesto de un ThetaProbe incorporado en una matriz porosa (Instrumentos Delta-T 1999). El contenido de agua de esta matriz se equilibra con el del suelo circundante y el ThetaProbe detecta el agua absorbida por la matriz. Con cada sensor se entrega un certificado de calibración.

Figura 5-7 Sonda de Equipotenciómetro (Tipo EQ2)



Fuente: www.delta-t.co.uk

Ventajas: Rango de medición entre 0 y 1,500 kPa, mantenimiento gratis, posibilidad de registro de datos, se puede dejar instalado en suelos congelados, calibración estable por un periodo de dos años.

Desventajas: Una precisión de aproximadamente 10 kPa para mediciones entre 0 y 100 kPa, se requiere la calibración por parte del fabricante, no se adapta bien en suelos salinos, no es muy adecuado para suelos salinos.

5.2.9 Interruptores Electro-ópticos

El principio del método del interruptor electro-óptico para medir el potencial matricial se basa en el valor de la entrada del aire de un material delgado de la matriz, tal como el filtro de nylon (Scanlon et al. 2002), y en las variaciones en la transmisión de la luz a través de este material con contenido de agua (Cary et al. 1991). Los filtros de nylon son translúcidos a la luz infrarroja cuando están saturados. Cuando el potencial matricial disminuye por debajo del valor de la entrada del aire del filtro de nylon, el filtro empieza a desaturar; en consecuencia, la transmisión de la luz disminuye rápidamente y produce una variación de voltaje activando la abertura del conmutador (Scanlon et al. 2002). Se puede calcular la succión matricial relacionada con el tamaño del poro del filtro mediante la ecuación de incremento capilar, donde se asume que el ángulo de contacto es igual a cero. El instrumento desarrollado por Cary et al. (1991) está compuesto de un diodo luminoso infrarrojo, un disco de filtros de nylon, a través del cual pasa la luz, y un fotodiodo, el cual captura la luz que pasa. El rango de medición del instrumento depende del tamaño del poro en el filtro de nylon. El método del interruptor electro-óptico fue probado para valores próximos a la saturación (4 kPa) y hasta 2 500 kPa.

Ventajas: Bajo precio, estabilidad física, confiabilidad, mediciones rápidas, registro automático.

Desventajas: Dispositivo no fabricado, no existe información sobre mediciones de precisión, tecnología nueva no probada exhaustivamente.

5.2.10 Técnica del Papel de Filtro

La técnica del papel de filtro fue introducida por Gardner (1937) y se utilizaba sólo para medir la succión matricial en el laboratorio; por esta razón, en este documento sólo presentaremos este principio de forma breve. La técnica del papel de filtro fue empleada por varios autores (Hamblin 1981; Al-khafaf y Hanks 1974; Deka et al. 1995;

Chandler y Gutierrez 1986; Fawcett y Collis-George 1967; Greacen et al. 1987). El procedimiento de medición fue descrito por Scanlon et al. (2002) y consiste en colocar el filtro (15 cm de diámetro) en contacto directo con la muestra de suelo (100 g). Después del equilibrio, se mide el cambio en la masa del papel de filtro y se relaciona con el potencial matricial utilizando una curva de calibración previamente determinada. Se necesita calibración para cada papel de filtro utilizado.

5.2.11 Resumen de los Métodos de Medición de la Succión

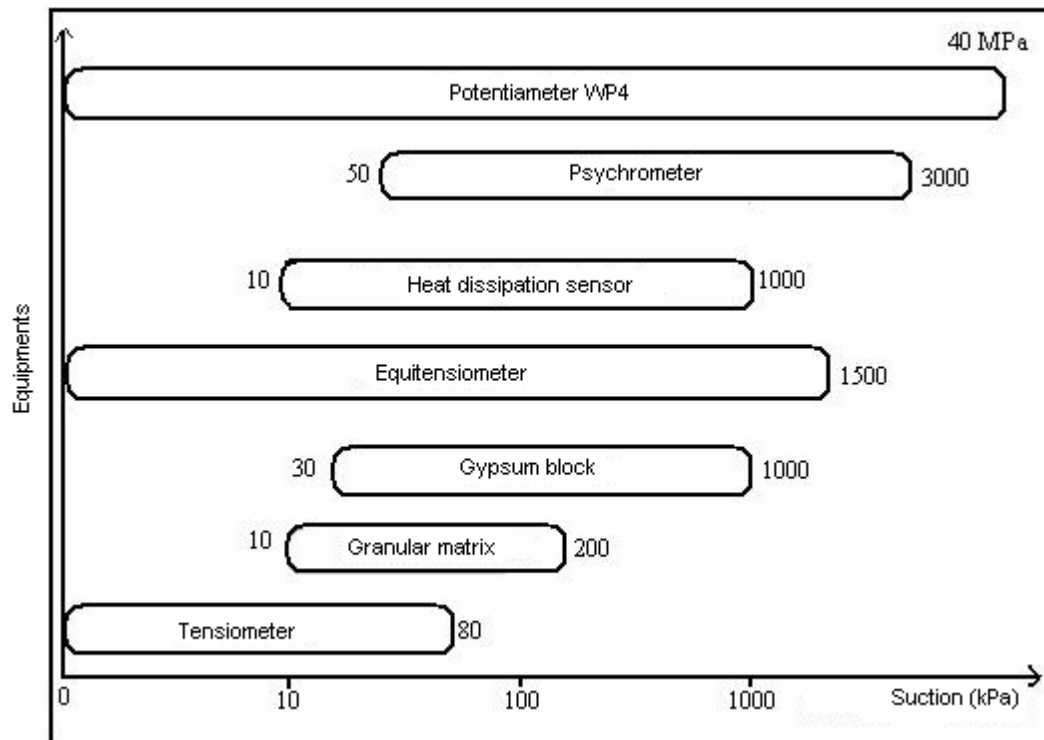
La Tabla 5-1 presenta un resumen de las principales características de los métodos de medición de la succión. De modo más específico, la tabla presenta lo siguiente: rango de medición, precisión, ámbito de influencia (relacionada con el área de las mediciones) método de instalación, capacidad de registro, efecto de la salinidad, tipo de suelo y mantenimiento de campo.

Como se puede observar en la tabla, la evaluación de la succión (en particular para valores de succión bajos) en un medio grueso resulta difícil, debido especialmente al rápido drenaje del suelo. Sin embargo, los tensiómetros, sensores de disipación de calor y el sensor de matriz granular han sido utilizados con éxito para monitorear la succión en sistemas de cobertura utilizadas para controlar el ARD de los residuos de minas (véase el Capítulo 7). El mantenimiento de campo constituye también un criterio importante para seleccionar el equipo apropiado encargado de monitorear la succión en los sistemas de cobertura. Debido a que los tensiómetros, potenciómetros y el equitensiómetro requieren un considerable mantenimiento de campo, y que los bloques de yeso se disuelven con el tiempo, no se recomiendan para monitoreos a largo plazo. También se debe tener en cuenta la precisión a la hora de elegir un buen equipo. La mayoría de los métodos tienen la suficiente precisión para utilizarlos en el monitoreo de los sistemas de cobertura; sin embargo, no se recomienda el uso de un sicrómetro para realizar mediciones precisas debido a su baja precisión (20 kPa; véase la Tabla 5-1).

Finalmente, un parámetro que debe tomarse en cuenta en la selección del dispositivo más apropiado para monitorear la succión es el rango de medición. Se ha diseñado un gráfico para ilustrar los rangos de medición de cada tipo de equipo (véase la Figura 5-8). Se pueden seleccionar diferentes equipos según el tipo de cobertura. Para las coberturas con efectos de barrera capilar (CCBE), es importante poder medir la succión para valores menores y mayores que el valor de la entrada del aire (ψ_a) de la capa de retención de humedad. Debido a que se suelen utilizar suelos limoníticos para retener la humedad en las CCBE ($5 \text{ kPa} < \psi_a < 50 \text{ kPa}$), es posible que un sensor de matriz granular y una sonda de disipación de calor sean los equipos más apropiados (también se pueden utilizar tensiómetros, pero éstos necesitan mantenimiento periódico). En el caso de los sistemas de cobertura SR o SDR, es necesario medir la succión mayor próxima a la superficie debido a la evaporación. En este caso en particular, los sensores de disipación de calor y los sicrómetros pueden ser más apropiados; asimismo, una combinación de sensores de matriz granular (ubicados cerca de los efectos de la barrera capilar) y sicrómetros (ubicados cerca a la superficie) puede constituir una opción adicional.

En resumen, existen diferentes opciones para monitorear la succión en los sistemas de cobertura utilizados para limitar la generación de ARD. Se debe justificar la elección de un determinado equipo para cada situación en particular.

Figura 5-8 Comparación entre los Rangos de Medición de Succión para Diferentes Equipos



5.3 Medición del Contenido Volumétrico de Agua

Se han desarrollado varios métodos para la medición del contenido volumétrico de agua del suelo; algunos de estos métodos son simples, mientras que otros utilizan técnicas avanzadas. Los principales métodos presentados a continuación son: métodos gravimétricos, métodos basados en radioactividad, métodos dieléctricos y métodos geofísicos.

5.3.1 Métodos Gravimétricos

Los métodos gravimétricos fueron desarrollados para calcular el contenido volumétrico de agua de los suelos. El método gravimétrico (AASHTO-T-265 y ASTM D2216) está compuesto de dos pasos: muestreo del suelo en el campo y determinación de la masa de agua contenida en esta muestra comparada con la masa del suelo seco (Reynolds 1970a y b; Gardner 1986). Se pueden utilizar diferentes técnicas de secado (por ejemplo, alcohol de quemar, horno de microondas, etc.), aunque probablemente el horno tradicional sea el método más extendido entre todos los métodos de secado. El muestreo del suelo se realiza utilizando un cilindro de volumen conocido (véase la Figura 5-9). Por lo general, una muestra de 50 a 100 g es suficiente para dichas mediciones (Starr et al. 1995; Reynolds 1970a). Este método fue utilizado en muchos estudios de campo (Burrows y Kirkham 1958; Greacen et al. 1981; Hodgson y Chan 1979; Topp et al. 1982; Evett y Steiner 1995) para evaluar el contenido volumétrico de agua. El uso de esta técnica permite obtener mediciones precisas del contenido volumétrico de agua; sin embargo, no se puede realizar el seguimiento de una ubicación en particular debido a que estas pruebas son destructivas y se requieren muestras para cada análisis.

Figura 5-9 Muestreo del Suelo utilizando un Cilindro de Volumen Conocido



Fuente: Melounou 1998

Ventajas: Mediciones con buena precisión, la salinidad y la naturaleza del suelo no lo afectan, fácil de realizar.

Desventajas: Prueba destructiva, toma mucho tiempo, no es posible registrar las mediciones, se requiere la medición de la densidad del suelo.

5.3.2 Métodos Radioactivos

1.4.1.1 Sonda de Neutrones

Esta técnica fue desarrollada en la década de los '50 (Gardner y Kirham 1952; van Bavel et al. 1956; Holmes 1956) y desde entonces se ha utilizado en varios estudios hidrogeológicos *in situ* (Burrows y Kirham 1958; Andrieu et al. 1962; Talineau y Lespinat 1971; Greacen y Hignett 1979; McKenzie 1990; Kamgar et al. 1993; Hignett y Evett 2002; Vicente et al. 2003). Se basa en la medición de los neutrones móviles, los cuales han sido moderados o termalizados mediante una colisión elástica con las partículas de hidrógeno existentes en el suelo. Las sondas de neutrones utilizan la propiedad de desaceleración preferencial de los átomos de hidrógeno para medir el contenido volumétrico de agua de los suelos. Estos átomos de hidrógeno provienen de las moléculas de agua y, por consiguiente, la desaceleración de los neutrones está relacionada con la humedad del suelo. Originalmente la fuente radioactiva era radio/berilio, pero actualmente la fuente más utilizada es americio/berilio.

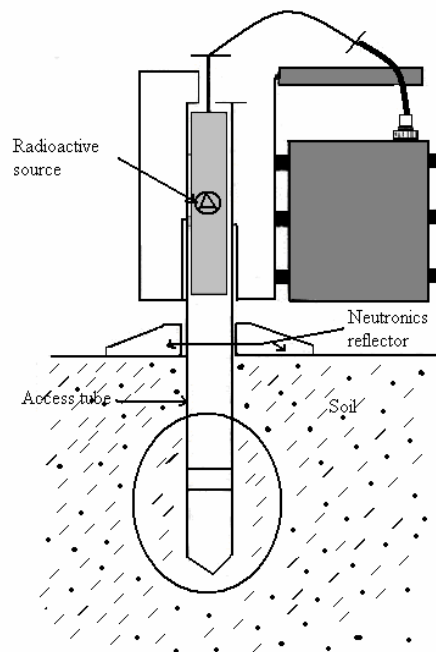
La configuración experimental está compuesta de (véase la Figura 5-10):

- Un tubo cerrado de aleación de aluminio (Carneiro y de Jong 1985) o PVC (Chanasyk y McKenzie 1986), el cual se inserta verticalmente en el suelo (donde se deja permanentemente). La instalación del tubo debe permitir un buen contacto con el suelo para obtener una buena precisión en la medición.
- Una fuente radiactiva y un detector; una vez que son emitidos por la fuente radioactiva, los neutrones rápidos colisionan con los átomos de hidrógeno presentes en el agua (que tienen una masa prácticamente idéntica) y en consecuencia pierden gradualmente

su energía cinética durante los choques elásticos. Los neutrones lentos se dispersan aleatoriamente y forman una nube alrededor de la fuente de emisión. Una parte de ellos se mueve hacia la sonda donde está ubicado el detector de neutrones (véase la Figura 5-10). Este detector está compuesto de una celda llena de gas de boro trifluoruro, y cuando un neutrón térmico se encuentra con un neutrón $^{10}\text{BF}_3$ se produce una emisión de una partícula alfa (el núcleo de helio); esta emisión de partículas alfa crea un pulso eléctrico en un alambre cargado.

La medición consiste en contar en un periodo de tiempo dado (alrededor de un minuto) el número de neutrones lentos que regresan a la sonda (como un pulso eléctrico). Este número es proporcional al contenido de agua del suelo. El volumen del suelo analizado con la sonda neutrónica tiene forma esférica (véase la Figura 5-10). El diámetro de esta esfera depende del contenido volumétrico de agua; este diámetro está comprendido entre 15 y 20 cm para un suelo húmedo, mientras que puede ser más alto para los materiales secos. Las principales causas de los errores de medición se atribuyen a la calibración de la sonda y la instalación del tubo. Asimismo, la presencia de materia orgánica en el suelo (que contiene partículas de hidrógeno) puede causar una sobreestimación del contenido de agua. Algunos elementos que absorben los neutrones (Fe, K, Mn) también pueden distorsionar las mediciones.

Figura 5-10 Dispositivo Experimental de Sonda de Neutrones



Ventajas: Precisión de alrededor de $0,005 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$, método bastante conocido.

Desventajas: Riesgos relacionados con la seguridad (ya que implica el uso de radioactividad), se requiere personal calificado, se necesita calibración para suelos específicos, es un instrumento pesado y voluminoso, tiempo de medición largo, baja precisión en mediciones próximas a la superficie del suelo (debido a las interacciones con la atmósfera), lecturas manuales, adquisición costosa, requiere calibración debido a la desintegración de la fuente radioactiva con el paso del tiempo, se necesita capacitación especializada y autorización del gobierno para el transporte, posesión y uso de la fuente radioactiva.

1.4.1.2 Rayos Gama

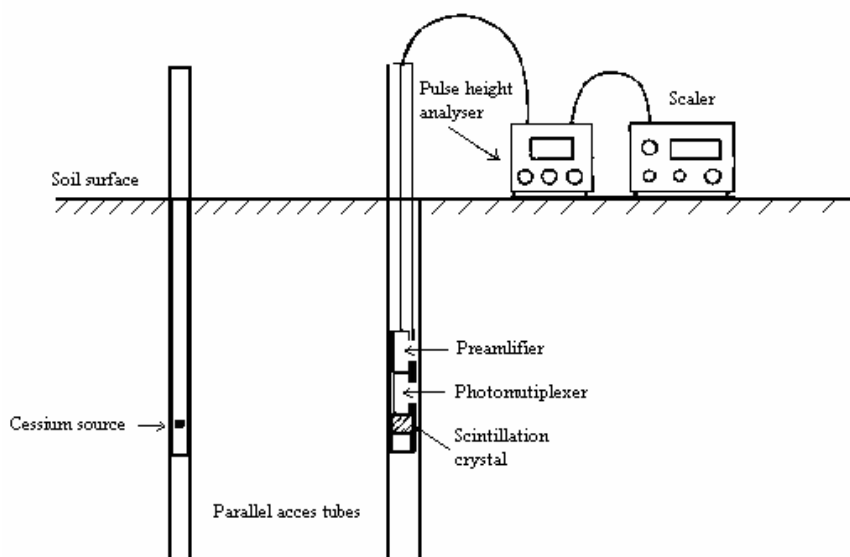
Este método de medición se basa en la absorción de rayos gama por parte del medio circundante; fue desarrollado en 1959 (Fergusson 1959) y luego mejorado (Davidson et al. 1963; Reginato y van Bavel 1964; Wack 1969; Vachaud 1968). Los rayos gama son ondas electromagnéticas emitidas por una fuente radioactiva que se caracteriza por su actividad y su intensidad de radiación. La detección de la radiación se realiza por medio de medidores (del tipo Geiger-Muller); su principio se basa en el hecho de que cada fotón detectado produce un pulso, el cual puede ser contabilizado mediante un escalador. La amplitud de este impulso es proporcional a la energía del fotón detectado. El número de pulsos detectados por unidad de tiempo es proporcional a la intensidad del haz.

El proceso de interacción entre la radiación y la matriz del suelo dependen de la energía de los fotones incidentes. Se identifican dos tipos de interacción: efecto fotoeléctrico (absorción) y difusión (absorción progresiva, pérdida de energía por choques elásticos). El nivel de atenuación de los haces de rayos gama emitidos depende de los componentes del suelo y de su densidad *in situ*.

La configuración de la medición está compuesta de (véase la Figura 5-11):

- La fuente de la sonda, la cual, como su nombre lo indica, se utiliza como fuente de emisión de radiación, la cual generalmente se presenta en forma de pastillas de Cesio;
- la cadena de detección, compuesta de cristal de yoduro de sodio activado con talio, al cual se encuentran asociados un fotomultiplicador y un preamplificador;
- un discriminador- selector de amplitud, conectado al dispositivo anterior, el cual rechaza los impulsos provenientes de fotones gama difusos y no absorbidos totalmente. El discriminador se conecta a un medidor, el cual registra los impulsos durante un intervalo de tiempo preseleccionado.
- Las mediciones de campo, las cuales requieren la instalación de dos tubos paralelos separados por una distancia conocida. En estos dos tubos se instalan dos sondas: la primera para emisiones y la segunda para la detección (véase la Figura 5-11).

Figura 5-11 Dispositivo Experimental de Sonda de Rayos Gamma



Fuente: Hillel 1998.

Ventajas: Buena resolución espacial, precisión de aproximadamente 0,01, permite mediciones a diversas profundidades, posibilidad de registro de datos.

Desventajas: Riesgos de radiación, se requiere personal calificado, instalación compleja (dos tubos) se necesita un haz fino, el cual se obtiene por colimación, se requiere calibración, la adquisición es costosa, las variaciones de la densidad del suelo lo afectan, errores de medición cuando se utiliza en suelos estratificados.

5.3.3 Métodos Dieléctricos

El suelo está compuesto de tres partes: aire, agua y sólidos. Cada componente del suelo tiene su propia propiedad electromagnética (generalmente llamada constante dieléctrica o permisividad K_{ab}); a 20°C la constante dieléctrica del aire $K_{air} = 1$, la constante dieléctrica de los sólidos K_{solid} oscila entre 2 y 5, y la constante eléctrica del agua $K_{water} = 80.18$. Por consiguiente, la permisividad total del suelo está principalmente dominada por la del agua. Drake et al. (1930) y Wyman (1930) fueron los primeros en trabajar en la medición de constante dieléctricas de soluciones acuosas. En la década de los 70, los progresos electrónicos hicieron posible determinar los efectos de la densidad, contenido de agua y frecuencia de excitación en las mediciones dieléctricas del suelo (Hipp 1974). En consecuencia, se hizo posible calcular el contenido volumétrico de agua a través de la medición de la permisividad del suelo K_{ab} .

1.4.1.3 Reflectómetro de Dominio Temporal (RDT)

El método del reflectómetro de dominio temporal (RDT) es ampliamente conocido para determinar el contenido de agua en los suelos y en otros medios porosos (Robinson et al. 2005; Topp et al. 1980; Topp y Ferre 2002). Este método utiliza las propiedades dieléctricas del suelo. La permisividad del suelo (K_{ab}) se determina midiendo el tiempo de propagación de un impulso electromagnético por la línea de transmisión colocada en el suelo. Debido a que la velocidad de propagación (v) está relacionada con la K_{ab} , esta última es por consiguiente proporcional al cuadrado del tiempo de tránsito (t , en segundos) por las líneas de transmisión:

$$K_{ab} = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left[\frac{(c * t)}{2 * L}\right]^2 \quad (5.2)$$

donde c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío (3×10^8 m/s) y L es la longitud de la línea de transmisión colocada en el medio (en m).

El instrumento RDT utilizado para medir la K_{ab} (véase la Figura 5-12) está compuesto de un generador de impulsos, un muestreador y un osciloscopio. El generador de impulsos genera impulsos eléctricos de onda cuadrada que viajan a lo largo del cable. Sus reflexiones se cronometran empleando un medidor adjunto al generador de impulsos (frecuencias típicamente cercanas a 1 GHz) y la información se visualiza como una forma de onda RDT por medio de un osciloscopio. Cuando se utiliza un RDT para medir la K_{ab} de un suelo, los conductores se colocan por lo general en el extremo del cable coaxial y se les denomina sonda. Una sonda RDT suele estar compuesta de dos o tres guías de ondas metálicas paralelas (véase la Figura 5-12).

Figura 5-12 Aparato RDT y Sondas Utilizadas para Medir el Contenido de Agua



Fuente: Soil Moisture Equipment Corp. 2005

La orientación de la sonda en el suelo puede tener influencia en las mediciones del contenido volumétrico de agua. Para el monitoreo a largo plazo, las sondas se instalan usualmente de forma horizontal en la pared de un tajo o zanja de poca profundidad. Una de las principales razones para utilizar una sonda orientada horizontalmente es medir la humedad del suelo a una elevación única en el perfil del suelo. Sin embargo, este método de instalación es altamente invasivo y generalmente está limitado a los 2 m superiores de la zona no saturada, aproximadamente (Herkeleth y Delin 2006). Otro método de instalación consiste en colocar las sondas en forma vertical en una perforación; esto permite la instalación de sondas de humedad del suelo a cualquier profundidad dentro de la zona no saturada. Una desventaja de este tipo de instalación es que la información recolectada no representa una profundidad única sino más bien el promedio de la humedad del suelo medida sobre toda la longitud vertical de la sonda (Herkeleth y Delin 2006). Otra desventaja es que la perforación sobre la sonda está rellena con suelo que puede estar pobremente compactado, lo cual podría alterar el flujo vertical del agua. Por lo tanto, las mediciones de la humedad del suelo utilizando una instalación vertical pueden no ser representativas del suelo nativo no alterado. Se conoce poco acerca de cómo la orientación de la sonda afecta las mediciones de la humedad del suelo.

El diámetro y la longitud influyen en las mediciones (Campbell Inc. 2001; Zegelin et al. 1992). Estos dos parámetros (longitud y diámetro de la guía de onda) están relacionados con la naturaleza del suelo estudiado y se deben tomar en cuenta al elegir una sonda RDT. Para obtener mediciones representativas, el diámetro de las varillas debe ser al menos 10 veces el diámetro promedio del suelo (MEND 2001).

Topp et al. (1980) propusieron un enfoque universal y establecieron una relación entre la K_{ab} y el contenido volumétrico de agua del suelo. La ecuación empírica propuesta es la siguiente:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \times K_{ab} - 5.5 \times 10^{-4} \times K_{ab}^2 + 4.3 \times 10^{-6} \times K_{ab}^3 \quad (5.1)$$

Donde θ es el contenido volumétrico de agua y K_{ab} es la permisividad del suelo. Esta relación es válida para la mayoría de suelos (independientemente de su composición y

textura) y para contenidos de agua bajo 50 % (Munoz-Carpena 2004). También se desarrollaron otras relaciones empíricas similares (Dannowski y Yamaranci 1999; Yu et al., 1999) que dieron resultados análogos a los de Topp et al. (1980). Es importante señalar que la relación utilizada depende de la frecuencia de la onda electromagnética.

Es necesario realizar una calibración específica para contenidos volumétricos de agua más altos, y para suelos sulfurosos, orgánicos o volcánicos (Robinson et al. 1994; Jacobsen y Schjonning 1993a; Dirksen y Dasberg 1993;). La salinidad y/o la composición arcillosa del suelo (Skaling 1992; Jacobsen y Schjonning 1993b; Zeglin et al. 1992) y/o la presencia de minerales de hierro (Robinson et al. 1994) pueden afectar las mediciones atenuando los impulsos reflejados. En los suelos que tienen alta salinidad, se pueden resolver los problemas originados por este factor cubriendo las varillas utilizando resina epóxica; sin embargo, esto implica una pérdida de la sensibilidad y el cambio de la calibración.

Es interesante notar que, además del tiempo de tránsito, se puede relacionar otra característica del impulso que cruza el suelo (es decir, la atenuación del impulso) con la conductividad eléctrica del suelo. Según estas características, algunos dispositivos comerciales permiten medir el contenido de agua y la salinidad del suelo de forma simultánea.

Ventajas: Precisión entre 0,01 y 0,025, no se requiere calibración específica para cada suelo, las mediciones en diversos lugares se facilitan por medio de un múltiple, amplia variedad de configuraciones de sonda, alteración mínima del suelo, no muy sensible con niveles normales de salinidad, puede proporcionar mediciones simultáneas de conductividad eléctrica del suelo, ha sido utilizado en el monitoreo de coberturas.

Desventajas: Uso limitado en suelos con alta salinidad, en suelos arcillosos altamente conductivos y en material sulfuroso, se requiere calibración para algunos suelos, el área de medición está limitada a un radio de 3 cm alrededor de la longitud de las guías de onda metálicas de las sondas.

1.4.1.4 Dominio de Frecuencia: (DF): Capacitancia y Reflectometría en el Dominio de Frecuencia

El DF fue propuesto a finales de la década de los 20 por Wyman (1930), pero no se pudo aplicar hasta el desarrollo de una sonda para mediciones *in situ* hecha por Malicki (1983). Posteriormente, su uso se extendió y se desarrolló un instrumento portátil (Dean et al. 1987) el cual fue evaluado y calibrado por Bell et al. (1987). Se desarrollaron otras sondas DF que tenían el mismo diseño del RDT (Robinson y Dean 1993; Hilhorst y Dirksen 1994).

El concepto de capacitancia eléctrica es que un condensador que usa el suelo como dieléctrico depende del contenido de agua en este medio. Al conectar este condensador a un oscilador para formar un circuito eléctrico se pueden detectar los cambios del contenido volumétrico de agua en el medio a través de las variaciones de frecuencia del circuito. Esta técnica de dominio de frecuencia (DF) se utiliza en sondas de capacitancia y en sondas de reflectometría en el dominio de frecuencia (RDF). Para las sondas de capacitancia, la permisividad del suelo se determina midiendo el periodo de carga del capacitor con el suelo; mientras que en las sondas RDF, la determinación de la frecuencia de resonancia (a la que corresponde la amplitud más alta) se utiliza para establecer el contenido de agua del medio.

Las sondas suelen estar compuestas de dos o más electrodos que se insertan en el medio. La sonda se coloca en un tubo de acceso instalado anticipadamente en el suelo (véase la Figura 5-13). Cuando se aplica un campo eléctrico, el suelo alrededor de los electrodos (o tubo) está compuesto de un condensador dieléctrico, el cual completa el circuito de oscilación. El uso de un tubo de acceso permite realizar mediciones a diversas profundidades (véase la Figura 5-14).

Figura 5-13 Sonda de Dominio de Frecuencia Tipo Echo

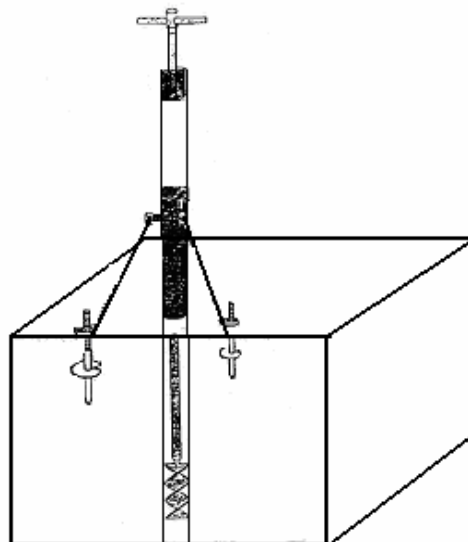


Fuente: www.Decagon.com

Ventajas: Precisión de aproximadamente 0,01 después de la calibración, posibilidad de mediciones en suelos con alta salinidad, mejor resolución que las sondas RDT, posibilidad de conexión con registradores convencionales, flexibilidad en el diseño de las sondas (mayor que el RDT), no es muy caro en comparación con el RDT.

Desventajas: Ámbito pequeño de influencia (aproximadamente 4 cm), sensibilidad a la temperatura, densidad, composición arcillosa y al atrapamiento de aire, requiere calibración.

Figura 5-14 Equipo de Perforación Utilizado para la Instalación de los Tubos de Acceso



1.4.1.5 Reflectometría en el Dominio de Amplitud (RDA): Impedancia

Los avances en electrónica y el desarrollo de técnicas tales como RDT y DF en los últimos veinte años o más permitieron desarrollar dispositivos basados en las propiedades dieléctricas de los suelos (George 1999). Estas sondas basadas en la impedancia pueden diseñarse fácilmente para realizar mediciones continuas del contenido volumétrico de agua (Gaskin y Miller 1996). La relación entre la línea de impedancia y la K_{ab} constituye la base del enfoque de la RDA. La proporción conocida r_1/r_2 (r_1 es el radio del conductor interno y r_2 es el radio del conductor blindado) hace posible medir la influencia de la K_{ab} en la impedancia (Z):

$$Z = \frac{60}{\sqrt{K_{ab}}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (5.3)$$

La proporción de la impedancia del suelo medido en comparación con una impedancia de referencia estándar se utiliza para calcular el contenido volumétrico de agua:

$$\theta = \frac{\sqrt{k_{ab}} - q}{p} \quad (5.4)$$

donde q y p son las constantes específicas del suelo calculadas respectivamente a 1,6 y 8,1 (Gaskin y Miller 1996).

Cuando una onda electromagnética (energía) que viaja por una línea de transmisión alcanza una parte de la línea que tiene una impedancia diferente, parte de la energía transmitida se refleja nuevamente en el transmisor. La onda reflejada interactúa con la onda emitida y cambia la amplitud total de la onda a lo largo de la longitud de la línea de transmisión. Si la combinación de suelo/sonda origina el cambio de la impedancia de la línea de transmisión, la medición de la diferencia de amplitud dará la impedancia de la sonda (Gaskin y Miller, 1996; Nakashima et al. 1998). Con este resultado es posible calcular la permisividad y finalmente el contenido volumétrico de agua.

El instrumento (véase la Figura 5-15) está compuesto de un oscilador, el cual produce una señal sinusoidal (onda electromagnética a una frecuencia fija: por ejemplo 100 MHz). Esta señal sinusoidal se transmite a la línea de transmisión y se propaga en el suelo a través de las varillas de metal paralelas; estas últimas tienen la función de una sección adicional de la línea de transmisión, con una impedancia que depende de la constante dieléctrica del suelo que circunda los cables de la sonda. La técnica compara una sección de la línea de transmisión fija con un conjunto de electrodos de acero inoxidable, cuya impedancia característica varía con el contenido de agua del suelo donde se encuentran incrustados. Por consiguiente, se obtiene el contenido volumétrico de agua de la matriz del suelo (Wijaya et al. 2002)

Ventajas: Precisión de aproximadamente 0,05 (cm^3/cm^3), puede alcanzar 0,01 (cm^3/cm^3) con calibración, posibilidad de mediciones en suelo con mucha salinidad, mínima alteración del suelo, posibilidad de registro de datos, bajo costo, la temperatura no lo afecta, evaluación *in situ* de la densidad del suelo.

Desventajas: Se recomienda calibrarlo para obtener mediciones fiables y ámbito pequeño de influencia.

Figura 5-15 Sensor de Reflectometría en el Dominio de Amplitud Tipo Thetaprobe



Fuente: www.delta-t.co.uk

1.4.1.6 Transmisión de Fase (Sonda Virrib)

La técnica de la sonda Virrib se basa en la propagación de ondas electromagnéticas a través del suelo. El sensor está compuesto por dos círculos concéntricos de acero inoxidable, conectados dentro del cuerpo del sensor, donde se localiza la electrónica propiamente dicha. El cuerpo del sensor se fija mecánicamente con material incrustante, el cual evita también la penetración del agua a la parte electrónica (Sowacs 2006; véase la Figura 5-16). El diámetro del anillo externo es de 280 mm; su capacidad de medición es de 15-20 dm³ de suelo. El sensor utiliza corriente DC con un voltaje entre 12 a 20 voltios de una fuente externa (Komin, Technical Data; Walker et al. 2004). Después de desplazarse por una cierta distancia fija, una onda sinusoidal mostrará un desfase relativo comparado con su fase original. Este desfase depende de la longitud del desplazamiento por la línea de transmisión, la frecuencia y la velocidad de la propagación. Debido a que la velocidad de propagación de la onda está relacionada con el contenido de agua del suelo, se puede determinar el contenido de agua del suelo para una frecuencia y longitud de desplazamiento fijos por medio de este desfase (Munoz-Carpena, 2004). La sonda Virrib puede ser instalada horizontalmente (medición de 12 cm de espesor) o verticalmente (medición de 30 cm de espesor). Debido a la alteración del suelo, se ha observado que estos sensores generalmente requieren algunos meses de ajuste antes de poder realizar mediciones representativas de la humedad del suelo (Walker et al. 2004; Komin, Información técnica).

Figura 5-16 Sensor Virrib Basado en la Técnica de Transmisión de Fase



Fuente: www.microirrigationforum.com

Ventajas: Precisión en las mediciones de aproximadamente 0,01 (cm^3/cm^3), volumen significativo de mediciones de suelo 15-20 litros, posibilidad de registro de datos, bajo costo.

Desventajas: Alteración significativa del suelo, se requiere calibración para obtener mediciones confiables, sensible a la salinidad.

1.4.1.7 Transmisión en el Dominio Temporal

El método de transmisión en el dominio temporal (TDT) mide el tiempo de desplazamiento de un impulso electromagnético por la línea de transmisión en una dirección. El tiempo de desplazamiento se define como el tiempo que toma una señal electromagnética para desplazarse en una dirección por la línea de transmisión. En la práctica, el tiempo de desplazamiento medido es la suma del tiempo que toma el desplazamiento por los cables de conexión y la línea de transmisión. Se realizan dos mediciones para aislar el tiempo de desplazamiento a través de la muestra (Chawn et al. 2003). La primera es el tiempo de desplazamiento por los cables de conexión de la línea de transmisión incrustada en el medio analizado (t_m). La segunda es el tiempo de desplazamiento por los cables de conexión y la misma línea de transmisión en el aire (t_{air}).

La prueba de TDT utiliza la misma técnica que la RDT, pero requiere una conexión eléctrica en los dos extremos de la línea de transmisión (véase la Figura 5-17). A pesar de esto y en comparación con la sonda de RDT, el circuito es simple. Esta técnica fue empleada por Brisco et al. (1992), Dasberg y Hopmans (1992), Roth et al. (1992), Weitz et al. (1997), Wraith y Or, (1999) y Chawn et al. (2003).

Figura 5-17 Sonda TDT Utilizada en la Medición del Contenido Volumétrico de Agua



Fuente: www.esica.com

Ventajas: precisión que oscila entre 0,01 y 0,02 (cm^3/cm^3), medición del volumen del suelo comprendida entre 0,8 y 6,l, posibilidad de registro de datos, costo relativamente bajo.

Desventajas: poca precisión, alteración significativa del suelo durante la instalación en el campo debido a la configuración de la sonda.

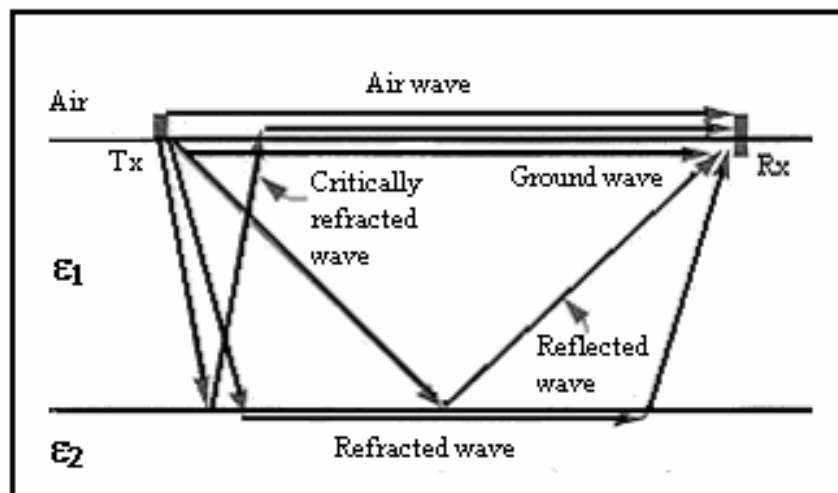
5.3.4 Métodos Geofísicos de Campo a Gran Escala

Un método que utiliza radiaciones radioactivas y la permisividad eléctrica del suelo mide el contenido del agua en una ubicación específica (mediciones con precisión milimétrica) en el campo, resultando costosa su utilización en el monitoreo de áreas grandes. Se han desarrollado y adaptado otros métodos para medir el contenido volumétrico de agua del suelo a gran escala; entre estos se encuentran los siguientes: radar de penetración de suelo, inducción electromagnética, radiometría y tomografía (que recoge la resonancia magnética nuclear, la resistividad eléctrica y las ondas acústicas). En los siguientes párrafos se presenta una breve descripción de las diversas técnicas utilizadas para medir el contenido volumétrico de agua del suelo.

1.4.1.8 Radar de Penetración de Suelo

La técnica del radar de penetración de suelo (SPR) es similar en principio a las técnicas de reflexión sísmica y de sonar. El radar produce ondas electromagnéticas de alta frecuencia (10 a 1,000 MHz), las cuales son transmitidas al suelo mediante una antena de origen colocada en la superficie (Huisman et al. 2002). La velocidad de propagación de las ondas del radar a través del suelo depende principalmente de la permisividad dieléctrica del suelo, la cual guarda correlación con el contenido volumétrico de agua. La onda reflejada es detectada por la antena receptora como una función del tiempo (Davis y Annan 1989). Este método ha sido utilizado por varios autores para calcular contenidos volumétricos de agua (Chanzy et al. 2001; Davis y Annan 2002; Galagedra et al. 2003; Grote et al. 2003; Huisman et al. 2001; Huisman et al. 2002; Parkin et al. 2000; Redman et al. 2002; van Overmeeren et al. 1997; Weiler et al. 1998).

Figura 5-18 Rutas de Propagación de Ondas Electromagnéticas en un Suelo con Dos Capas de Permisividad Dieléctrica de Contraste



Fuente : Sperl 1999

En la Figura 5-18 se muestra la ruta posible de propagación de las ondas del radar a través de un suelo de dos capas. La velocidad de propagación de estas ondas puede utilizarse para evaluar las propiedades dieléctricas de las diferentes capas y también para el contenido volumétrico de agua del suelo; el cálculo de este último se realiza utilizando diferentes métodos adaptados para cada tipo de onda: onda reflejada, onda sísmica y ondas transmitidas entre la excavación y la superficie. Se pueden encontrar mayores detalles sobre estos enfoques en Davis y Annan, (2002), Huisman et al. (2003), Du y Rummel (1994), Huisman (2002) y Hubbard et al. (2002).

1.4.1.9 Inducción Electromagnética

La inducción electromagnética es una técnica no invasiva. Se basa en el principio de las corrientes de Foucault inducidas en materiales de conducción mediante la variación del campo magnético utilizando una antena de origen. El campo magnético aplicado induce las corrientes de Foucault en el subsuelo conductivo, el cual genera un campo magnético secundario detectado en la superficie del suelo o utiliza un avión equipado con una antena receptora. Los campos magnéticos primario y secundario se miden mediante una bobina de inducción muy sensible, la cual distingue los dos campos magnéticos según su intensidad y su fase (Ackman 2003; Hammack et al. 2003). Esta técnica fue utilizada en varios estudios de campo con equipos portátiles tales como el EM 38 (véase la Figura 5-19 - Kachanoski et al. 1990; Robert y Scanlon 2003; Sheets y Hendrickx 1995).

Figura 5-19 Equipo Portátil Tipo EM 38



Equipo Portátil Tipo EM 38 que utiliza la técnica de inducción electromagnética para medir el contenido de agua.
Fuente: www.geonics.com

1.4.1.10 Radiometría y Radiaciones de Microondas

La banda espectral electromagnética asociada con las microondas incluye frecuencias desde 0,3 hasta 300 GHz. Esta banda superpone la frecuencia utilizada para la determinación del contenido de agua (es decir, 0,05 a 10 GHz). La absorción o la emisión de microondas por el suelo dependen principalmente de la permisividad del medio. La profundidad de investigación está en función de la longitud de onda utilizada, el contenido de agua del suelo y el tipo de suelo (White y Zegelin 1995; Paloscia et al. 2001).

Radiometría de Microondas

La radiometría de microondas, o la teledetección de microondas pasivas, se basa en las mediciones de la radiación electromagnética normal de los objetos en longitudes de onda que oscilan entre mm y dm (Njoku y Kong 1977; Shutko 1992; Schmutgge 1985;

Jackson 1993). Se pueden realizar investigaciones en superficies de agua y en el suelo en una banda espectral entre 2 a 30 centímetros. En este rango espectral, la radiación terrestre está relacionada principalmente con el contenido de agua libre del suelo.

Los sistemas de radar utilizan la misma banda de frecuencia que el radiómetro pasivo, por lo que tienen características similares de propagación de onda, aunque los sistemas de radar transmiten activamente y miden los valores de las ondas de retorno. El sistema pasivo registra sólo la radiación emitida naturalmente por el suelo, la cual está en función del contenido de agua en los primeros metros del suelo. Se pueden realizar mediciones del contenido de agua utilizando un sistema pasivo desde un avión en vuelo a baja altura (elevación aproximada de 500 pies).

Radiación de Microondas

Las radiaciones de microondas determinan la permisividad del suelo, la cual guarda correlación con el contenido volumétrico de agua, midiendo la reflexión de las ondas electromagnéticas emitidas hacia la tierra por el radar. La fuente de alimentación del radar produce una señal electromagnética, la cual se propaga desde el aire hasta el suelo, donde la señal electromagnética se refleja a través de un ángulo en particular. El sensor del radar recibe la señal de retorno (o retrodifusa) y registra la fase y la amplitud de las ondas. Estos parámetros permiten calcular la proporción de emisión/recepción. El contenido de agua en los primeros centímetros de la tierra influye en la señal de las ondas retrodifusas modificando su amplitud (Tansey et al. 1999; Robinson et al. 2003). La profundidad de investigación depende de la longitud de onda utilizada.

Tansey et al. (1999) utilizaron el radar de antena sintética en un satélite de teledetección para evaluar el potencial de este sistema en el cartografiado del contenido de agua del suelo. El radar de frecuencia utilizado durante este estudio fue de 5,3 GHz, y los resultados muestran que la profundidad de investigación fue de 5 cm. El éxito del proyecto estuvo limitado por la geomorfología del campo y por la vegetación que influyó en la señal retrodifusa.

1.4.1.11 Resonancia Magnética Protónica, Tomografía de Resistividad Eléctrica y Tomografía Acústica

Durante los últimos años se desarrollaron y utilizaron varias técnicas tomográficas para medir el contenido de agua del suelo. Estos métodos se basan en la propagación de diversas señales. Entre estos métodos se encuentran la tomografía de rayos X (Jacobs et al. 1995), la resonancia magnética (Amin et al. 1998), la resistencia eléctrica (Binley et al. 1997; Zhou et al. 2001) y las ondas acústicas (Bording et al. 1987; Michelena y Harris 1991; Dietrich et al. 1995).

Tomografía de Resistividad Eléctrica

La tomografía de resistividad eléctrica fue empleada para determinar el contenido de agua del suelo por Zhou et al. (2001) y Dahlin (2000). El método se basa en la aplicación de una fuente artificial de corriente en el suelo por medio de dos electrodos externos y en la medición simultánea del potencial inducido utilizando otros electrodos colocados en las superficies. Cada medición potencial proporciona información sobre las propiedades eléctricas del suelo. La inversión de múltiples mediciones, hechas con líneas de electrodos superpuestas, permite la interpretación de la distribución bidimensional de la conductividad eléctrica en el suelo. Luego la distribución de la conductividad eléctrica se puede relacionar con el contenido volumétrico de agua, la

concentración de iones disueltos en el agua de porosidad y la conductividad superficial de los materiales del suelo.

Tomografía Acústica

Esta técnica fue utilizada con éxito en la determinación de las variaciones del contenido de agua en suelos por Berkenhagen et al. (1998) y Flammer et al. (2001). Estos autores señalaron que la velocidad de las ondas acústicas está relacionada con el módulo de elasticidad y con la densidad total del medio (Blum et al. 2004). Según Brutsaert (1964), el impacto del módulo de elasticidad en la velocidad acústica excede la influencia de la densidad del suelo; además, se estableció una relación entre las velocidades acústicas y el contenido de agua.

Técnicas Protónicas de Resonancia Magnética

Las técnicas protónicas de resonancia magnética (Magnetic Resonance Protonic - MRP) se basan en lo siguiente: cuando los protones (núcleos de hidrógeno de las moléculas de agua) se colocan en un campo magnético tienen momentos magnéticos alineados en equilibrio (tales como el campo magnético terrestre o un campo magnético artificial) en la dirección de este campo magnético principal. La emisión de un campo magnético de alteración a una frecuencia específica (conocida como Larmor) modifica este estado de equilibrio natural y causa una precesión de estos momentos en torno a la dirección del campo magnético natural. Después de alejar este campo magnético de alteración, los protones emiten un campo magnético de relajación, durante su retorno al equilibrio, el cual puede ser medido en la superficie (que constituye la respuesta MRP). La amplitud de este campo magnético es proporcional al número de protones ingresados en la resonancia y, en consecuencia, al contenido de agua de la tierra. El método MRP es un método no destructivo y permite determinar el contenido de agua del suelo hasta una profundidad de 50 a 100 m. El método MRP contribuyó a validar el concepto nuevo de rocas meteorizadas de basamento acuíferas y estratificadas en Bretaña (Wyns et al. 2004).

1.4.1.12 Principales Ventajas y Desventajas

Las principales ventajas de los métodos geofísicos presentados anteriormente para evaluar el contenido de agua en los suelos son las siguientes: no son destructivas y pueden medir el contenido volumétrico de agua en superficies relativamente grandes (no son métodos con precisión milimétrica). Sin embargo, estas técnicas (radar de penetración de suelo, inducción electromagnética, radiometría y radiaciones de microondas) requieren medios importantes (avión, radar, etc.), lo que resulta en interpretaciones que suelen ser complejas; estas técnicas no han sido validadas en coberturas de capas múltiples y requieren recursos humanos calificados. En consecuencia, el uso de estos métodos (sin los enfoques tradicionales, tales como la sonda de neutrones y los métodos RDT) no es recomendable.

5.3.5 Resumen de los Métodos de Medición del Contenido Volumétrico de Agua

Debido a que los métodos dieléctricos y nucleares constituyen los enfoques más utilizados y mejor conocidos para el monitoreo del contenido volumétrico de agua en los sistemas de cobertura, sólo se analizarán estas dos técnicas a continuación. La Tabla 5-2 muestra las principales características de estos métodos: precisión, método de instalación, capacidad de registro, efecto de la salinidad, suelos recomendados, mantenimiento de campo, destrucción del suelo e instalación.

Todos estos métodos de medición de contenido de agua no requieren mantenimiento de campo (véase la Tabla 5-2). Dos tipos de suelos no son recomendables para las sondas RDT y TDT; estos son los suelos densos, orgánicos y con alto contenido de arcilla. Además, la salinidad puede afectar las lecturas de ambos tipos de equipos; en la mayoría de las situaciones se puede aplicar una corrección de la salinidad. Respecto a la instalación de campo, las sondas de rayos gamma, de neutrones y TF presentan algunas dificultades, pero para los otros métodos sigue siendo sencillo. Si el registro de los datos es un tema importante, los métodos dieléctricos son más apropiados que los métodos nucleares. Todos los métodos proporcionan una suficiente precisión para el monitoreo de los sistemas de cobertura instalados en los residuos de minas.

Para la mayoría de estos métodos se han realizado diferentes evaluaciones en la bibliografía relacionada con el tema, a fin de determinar y comparar su desempeño. Algunas de estas evaluaciones presentan comparaciones entre los métodos (equipos nucleares y dieléctricos) mientras que otros concentran la comparación en los diferentes equipos de un método dado.

En cuanto a los métodos nucleares, las sondas de neutrones fueron las más utilizadas en el campo debido a la relativa simplicidad del dispositivo experimental (sólo un tubo en lugar de dos para las sondas de rayos gamma) mientras que las sondas de rayos gamma fueron utilizadas generalmente en el laboratorio (Tony 1970). La técnica de sonda de neutrones se considera resistente (Gardner y Kirkham 1952; Van Bavel et al. 1956; Gardner 1986) y apropiada para mediciones de campo a gran escala; sin embargo, contiene una fuente radioactiva, la cual requiere diferentes autorizaciones durante su transporte y almacenamiento, además de requerir personal calificado. Estos factores pueden limitar su uso en el campo.

Vicente et al. (2003) hicieron una comparación entre las sondas de neutrones y las sondas RDT y llegaron a la conclusión de que las mediciones del contenido de agua realizadas con estos métodos no mostraban diferencias significativas. Heng et al. (2000) llegaron a la misma conclusión para los suelos de grano fino. Por otro lado, la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA 2003) concluyó que la sonda de neutrones constituye el dispositivo más práctico para las mediciones de campo del contenido de agua del suelo (especialmente para las investigaciones científicas). Según estos estudios, se puede llegar a la conclusión de que es posible utilizar ambas técnicas (si se instalan apropiadamente y teniendo en consideración las particularidades de ambas tecnologías) para monitorear los sistemas de cobertura.

Como se mencionó anteriormente, los métodos dieléctricos incluyen RDT y DF (RDF y CP). Todas estas técnicas utilizan la relación empírica entre los contenidos de agua y la señal de salida de la sonda; esta última se puede relacionar con el tiempo, la frecuencia, la impedancia o la fase de onda. Las configuraciones de la sonda son variables y van desde guías de ondas simples hasta anillos circulares concéntricos. Estas técnicas fueron ampliamente empleadas durante las últimas décadas, pero su desempeño es bastante variable. De ahí que Hilhorst y Dirksen (1995) llegaron a la conclusión de que para medir el contenido de agua resulta más fácil y más preciso utilizar las técnicas de DF que las técnicas de RDT; sin embargo, la precisión y la resolución de las técnicas de DF disminuye cuando el contenido de agua baja. Walker et al. (2004) compararon las técnicas RTD y TF utilizando un método gravimétrico como un método de referencia y llegaron a la conclusión de que la técnica RDT proporciona una mejor precisión cuando incluyen técnicas TF (sonda Virrib). Evett y Steiner (1995) han estudiado en detalle la técnica CP y consideran que los resultados obtenidos con las sondas CP no son exactas y explicaron que las discrepancias se

debían a la falta de uniformidad de los suelos estudiados y al pequeño volumen utilizado en las mediciones. También llegaron a la conclusión de que la sonda CP tiene una precisión limitada que es insatisfactoria para las mediciones actuales de los contenidos de agua de campo.

De acuerdo a la bibliografía disponible, se puede concluir que el método RDT es el mejor de todos los métodos dieléctricos para medir el contenido volumétrico de agua en suelos con salinidad y contenido de arcilla bajos. Las técnicas de DF también pueden utilizarse en suelos con alto contenido de salinidad. Las sondas de neutrones también pueden ser apropiadas cuando se considera la calidad de las mediciones; la técnica es particularmente interesante cuando se requiere el perfil del contenido de agua y cuando se necesitan sólo algunos puntos de monitoreo.

5.4 Parámetros Meteorológicos

Los parámetros meteorológicos son esenciales para evaluar el balance de agua de los sistemas de cobertura. Concretamente, los componentes del balance de agua medidos con equipos meteorológicos son la precipitación (medida directamente) y la evaporación (calculado con parámetros meteorológicos o con mediciones directas). En los siguientes párrafos se presenta una breve descripción de estos parámetros.

Todos los parámetros meteorológicos que se presentan a continuación pueden ser medidos en forma simultánea utilizando estaciones meteorológicas (véase la Figura 5-20). Asimismo, debido a las variaciones geográficas de estos parámetros es preferible medirlos en el sitio. El número de estaciones meteorológicas dependerá de la superficie de la cobertura (para sitios mineros se suele instalar sólo una estación).

Figura 5-20 Estación Meteorológica Instalada en el Campo



5.4.1 Precipitación

La medición de la precipitación es fácil de realizar localmente, pero es una de las más complejas en cuanto a la meteorología debido a la heterogeneidad excesivamente espaciada de las precipitaciones. Está relacionada con los productos líquidos o sólidos de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o se deposita en el suelo proveniente del aire, expresado en altura o contenedor de agua de precipitación por unidad de área horizontal (mm) o en intensidad (mm/h). Existen diferentes instrumentos para medir las precipitaciones: pluviómetros, pluviómetros de registro y radares (Bras 1990; Blumer et al. 1994; Elomaa 1988; Goodison 1978; Sevruk 1986).

5.4.2 Temperatura

La temperatura del aire describe el estado térmico de la atmósfera; al mismo tiempo, la temperatura del aire es una medida de la energía cinética media de las moléculas de aire. La temperatura se mide en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), o en grados Kelvin (K), su equivalencia es $1^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K}$. La temperatura se puede medir con diferentes aparatos: termómetros de Galileo, termómetros de resistencia eléctrica, termómetros con máximos y mínimos y termómetros de burbuja.

5.4.3 Humedad Relativa

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire comparada con la cantidad máxima que puede retener a una temperatura particular. Se expresa como una fracción de la humedad máxima que el aire puede contener, a la misma presión y temperatura, antes de que las gotitas de agua formen nubes o rocío (si está cerca al suelo). La medición de la humedad relativa sigue siendo muy simple gracias a 2 instrumentos, el higrómetro tradicional y el psicrómetro.

5.4.4 Velocidad del Viento

La velocidad del viento se mide generalmente con un anemómetro. Se ha desarrollado una variedad impresionante de anemómetros desde el siglo XV, entre las que se encuentran varias versiones de cada uno de los siguientes cinco tipos principales: rotacional, tubo de presión, deflexión, termoeléctrico y ultrasónico y láser (Danish wind industry association 1997; Finnigan y Brunet 1995; Kaimal y Finnigan 1994).

5.4.5 Evaporación

El término evaporación abarca todos los procesos físicos que permiten el cambio de fase del agua del estado líquido a vapor. Se expresa en mm por día (cantidad de agua perdida en una superficie de 1 m^2 por día). Se puede calcular indirectamente mediante diferentes parámetros meteorológicos (temperatura, humedad, radiación y velocidad del viento; véanse los detalles en el Capítulo 2) o directamente por medio de instrumentos específicos de medición. Tres de los métodos que han sido utilizados para medir la evaporación en sitios de mina son (Newson y Fahey, 2003): el método de la razón de Bowen, el tanque de evaporación Clase A y el método del microlisímetro.

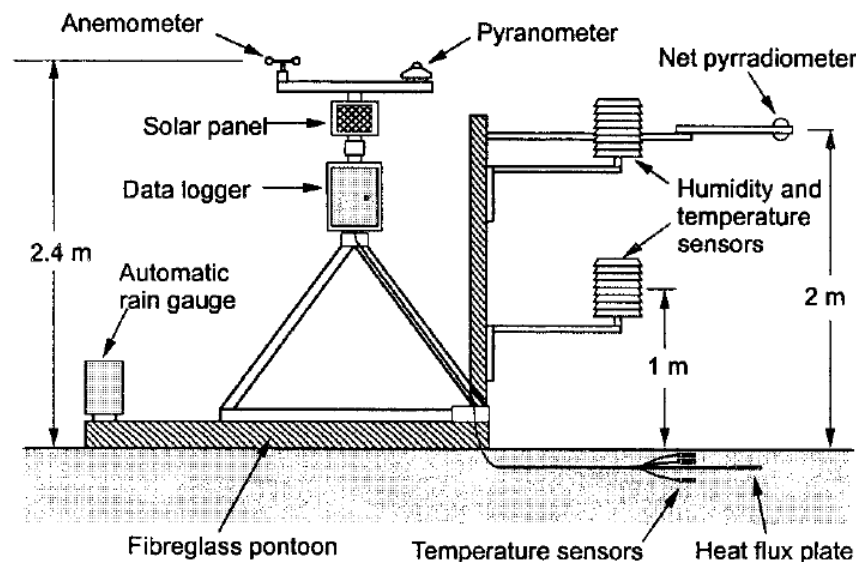
1.4.1.13 5.4.5.1. Método de la Razón de Bowen

El método de la razón de Bowen (β) se basa en las ecuaciones del balance de energía. Divide la energía disponible ($Q_{net} - G$) en flujo de calor sensible (h_s) y flujo de calor latente ($L_e \times E$). El parámetro β se puede determinar midiendo la temperatura y humedad del bulbo seco a dos alturas diferentes sobre la superficie. Respecto a la energía disponible, ésta se obtiene midiendo la radiación neta Q_{net} y el flujo de calor del suelo G . Luego se puede determinar la tasa real de evaporación (AE):

$$AE = \frac{Q_{net} - G}{L_e(\beta + 1)} \quad (5.5)$$

Este enfoque requiere el uso de una estación atmosférica de razón de Bowen (Figura 5-21). La instrumentación de esta estación incluye un piranómetro y un radiómetro neto para medir Q_{net} , sensores de humedad y temperatura colocados 1 m y 2 m sobre la superficie para medir el flujo de calor sensible H_s y sensores de temperatura y de flujo de calor en el material granular para medir el flujo de calor del suelo G (Fujiyasu et al. 2000). La estación suele estar equipada con un registrador de información y una fuente de alimentación independiente, tal como un panel solar (Martin 2005).

Figura 5-21 Dibujo Esquemático de Estación Atmosférica de Razón de Bowen (Fujiyasu et al. 2000)



1.4.1.14 5.4.5.2 Tanque de Evaporación Clase A

El tanque de evaporación Clase A es un cilindro amplio y poco profundo con un diámetro de 1,22 m y una profundidad de 0,25 m. El recipiente debe descansar sobre una base plana; éste se llena con agua y se monitorea a diario la altura del agua en el recipiente. Todos los días se añade agua para volver a llenar el recipiente a 25 mm desde la superficie. Finalmente se miden también las temperaturas máximas y mínimas. El recipiente de evaporación proporciona la cantidad de agua que se pierde

por evaporación durante un periodo de tiempo dado, el cual se suele expresar en unidades de longitud sobre el tiempo.

Debido a su simplicidad, los cálculos de evaporación preliminar a menudo se basan en la información local de la evaporación del tanque de Clase A. Aunque no es necesario representar la evaporación potencial, ésta proporciona un punto de referencia ampliamente accesible. Al utilizar este método, se debe tener en cuenta los efectos localizados, tales como la presencia de almacenamiento de agua (por ejemplo en los relaves), en la humedad relativa en las proximidades de la instalación, así como el efecto de la velocidad y la dirección del viento. Cuando los relaves están lo suficientemente húmedos, la tasa de evaporación es similar a la tasa de evaporación del tanque de Clase A (Fujiyasu et al. 2000; Martin 2005).

1.4.1.15 5.4.5.3 Método del Microlisímetro

El método del microlisímetro se utiliza para determinar la evaporación desde un punto cercano a la superficie. El principio consiste en aislar un cuerpo material de todo el sistema y determinar la pérdida de agua debido a la evaporación calculando su peso. Este método se ilustra en la Figura 5-22. Los envases están hechos preferentemente de PVC ya que éste posee una conductividad térmica más baja que el metal. La validez de este método depende de las condiciones del límite de los microlisímetros. Es importante que los límites de los envases no cambien la tasa de evaporación real. Para minimizar el impacto potencial de las condiciones del límite en la evaporación, este tipo de microlisímetro se usa normalmente para periodos cortos (< 24 horas). Una de las ventajas de los microlisímetros es que pueden fabricarse para representar las condiciones reales de campo con una razonable precisión. (Blight 1997). Sin embargo, con frecuencia es difícil realizar mediciones precisas de su peso, según el equipo que pueda llevarse al campo.

Figura 5-22 Representación Esquemática del Método del Microlisímetro (Newson y Fahey 2003)

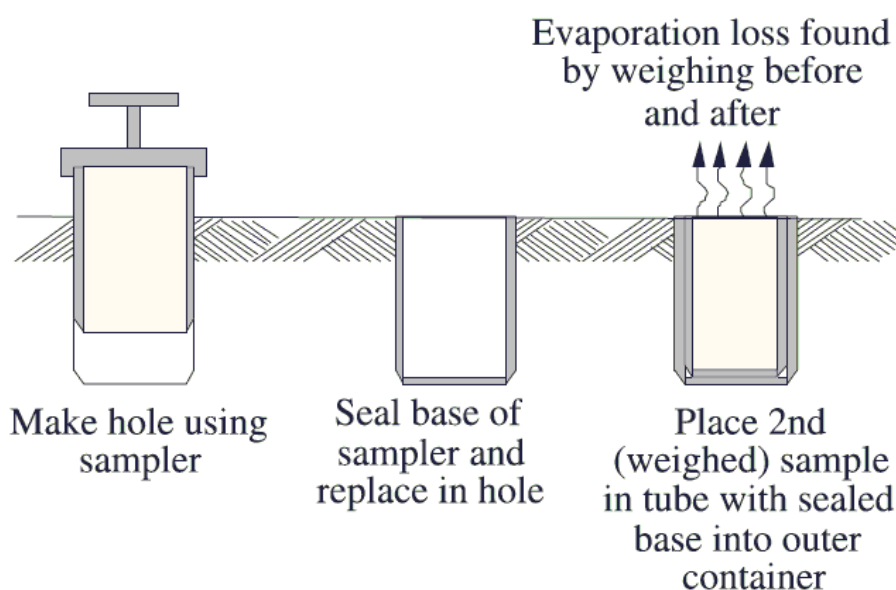
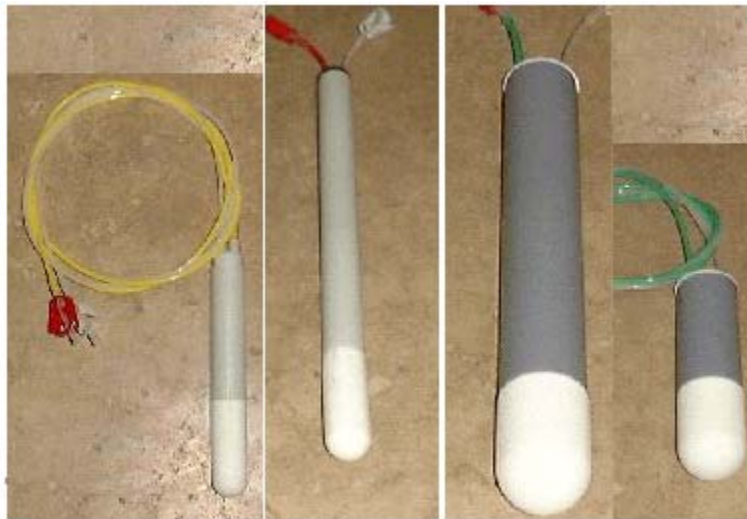
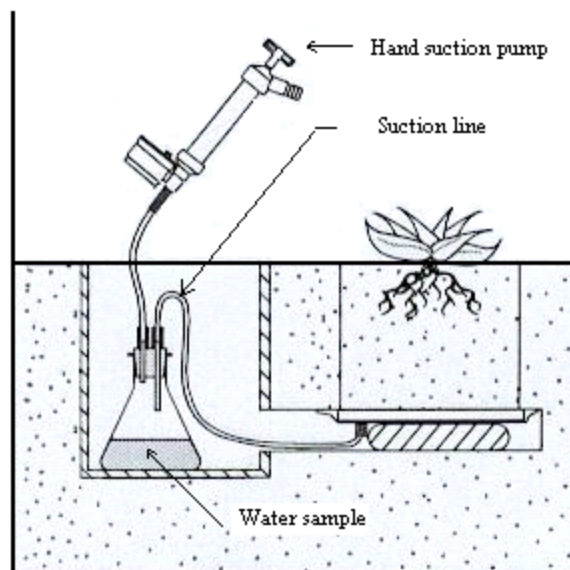


Figura 5-23 Diferentes Tipos de Muestreadores de Agua del Suelo



Fuente: www.soilmoisture.com

Figura 5-24 Dispositivo de Muestreo de Agua en un Área Vadosa no Saturada



Fuente: www.soilmoisture.com

5.5 Tasa de Filtración y Calidad de Agua

Las muestras de agua se pueden utilizar para medir la filtración del agua a través del suelo y las coberturas, y para evaluar la calidad de agua en los residuos de mina después de la construcción de la cobertura. Las muestras de agua se pueden recolectar utilizando dos tipos de lisímetros: de succión y de filtración.

5.5.1 Lisímetros de Succión

En las zonas vadosas no saturadas, los lisímetros de succión requieren la aplicación de succión para aspirar el agua a través de un dispositivo de muestreo. El principio de un lisímetro de succión es opuesto al de un tensiómetro (presentado anteriormente).

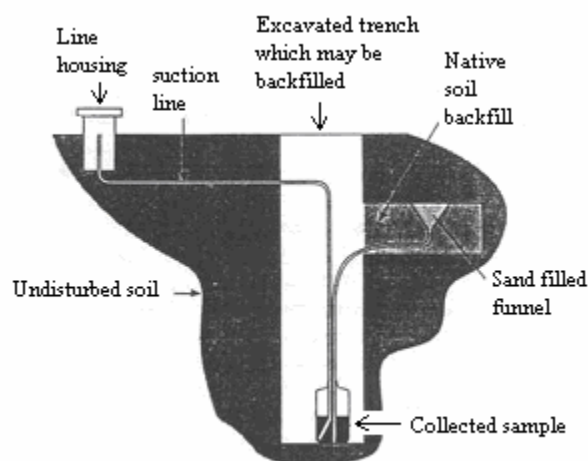
Los muestreadores se entierran en el suelo a una profundidad de interés, y se crea un vacío parcial en el muestreador, el cual hace que el agua del suelo circundante ingrese al muestreador a través de un filtro de cerámica poroso. Se extrae una muestra de agua del muestreador para su posterior análisis en el laboratorio. En el catálogo SME (2005) se muestran diferentes tipos de lisímetros de succión, que incluye muestreadores con diámetros entre 22,5 y 50 mm (véase la Figura 5-21). La extracción de agua se suele realizar utilizando una bomba de vacío, y la succión impuesta no debe exceder la presión de entrada del aire de la cubeta de cerámica porosa utilizada, a fin de evitar la filtración del aire dentro del muestreador (véase la Figura 5-22). Si la succión del suelo es muy alta, el tiempo de muestreo se incrementa, y a 60 kPa (y más), el flujo en el muestreador es tan débil que el muestreo del agua de porosidad resulta imposible (Wilson et al. 1995).

5.5.2 Lisímetros de Filtración

Los lisímetros de filtración se usan con frecuencia como parte de un sistema de monitoreo para medir el flujo de humedad a través de las coberturas con el fin de determinar si tienen un correcto desempeño (e.g., Swanson et al. 2003). También se utilizan para muestrear el agua filtrada para una evaluación posterior de la calidad de agua. El monitoreo del flujo de agua a través de las coberturas es a menudo complicado debido a que usualmente prevalecen las condiciones no saturadas. En el diseño de tales lisímetros de filtración se debe considerar varios temas, tales como la geometría del lisímetro, la tasa de filtración anticipada y las propiedades hidráulicas del material de relleno (Bews et al. 1999).

Los principales componentes de los lisímetros son envases enterrados con la parte superior abierta, los cuales recolectan y miden el agua del suelo. El agua que se infiltra por la cobertura alcanza el envase enterrado, se acumula y luego es transportada a una instalación de medición.

Figura 5-25 Diagrama de un Lisímetro Utilizado en el Muestreo de Agua



Fuente: (Wilson y Dorrance 1995).

El material utilizado como material de relleno debe ser similar (sino el mismo) al material donde se encuentra enterrado el envase y debe ser colocado en un estado similar (o porosidad). El lisímetro debe estar lo suficientemente profundo para desarrollar una carga de presión constante para las tasas anticipadas de infiltración.

La longitud y el ancho suelen ser el quíntuple de la profundidad, a fin de garantizar que los procesos de flujo preferencial serán captados en la prueba y que el proceso de construcción imitará las condiciones a escala real (Bews et al. 1999; Benson et al. 2001). Finalmente, se recomienda monitorear el contenido volumétrico de agua y/o la succión dentro y fuera del lisímetro para proporcionar información sobre la gradiente hidráulica. El muestreo del agua se puede realizar directamente en el lisímetro si el acceso es posible y fácil; de lo contrario, el muestreo del agua puede realizarse utilizando un dispositivo de succión (véase la Figura 5-25).

5.6 Pruebas Modificadas de Consumo de Oxígeno y Perfiles de Concentración de Oxígeno

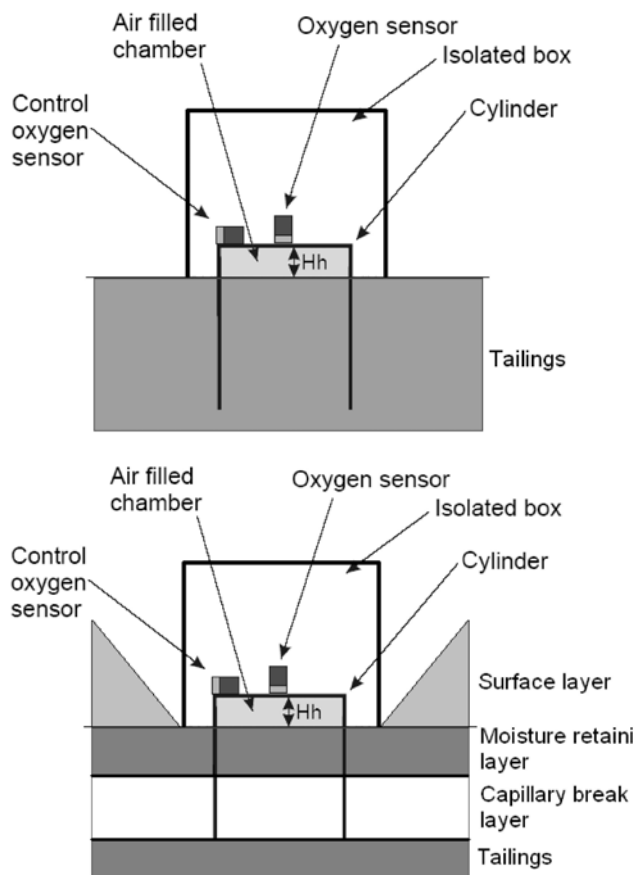
5.6.1 Pruebas Modificadas de Consumo de Oxígeno

En el campo, la prueba modificada de consumo de oxígeno (Modified Oxygen Consumption - MOC) se basa en la medición directa del flujo de oxígeno en los relaves cubiertos o no cubiertos. Se trata de una variación del procedimiento de prueba propuesto por Elberling et al. (1994). Diseñado para causar una menor alteración de los materiales probados, esta prueba consiste en introducir un cilindro de acero inoxidable (o de aluminio) en el suelo o en los relaves de mina para crear una zona aislada de su entorno. En los relaves cubiertos, el cilindro se introducirá a través de la capa de retención de humedad hacia la parte inferior de los relaves. Es preferible utilizar un cilindro más grande, a fin de evitar el movimiento lateral de los gases en los materiales no saturados (Aubertin et al. 2000b; Bussièrè et al. 2002; Mbonimpa et al. 2002). En la superficie se deja unos 2 a 5 cm de espacio superior para crear una cámara de oxígeno (véase la Figura 5-26). Luego se sella herméticamente el cilindro con una tapa que tiene un sensor de oxígeno para medir la disminución de la concentración de oxígeno en el depósito. Con la prueba MOC, las mediciones de concentración de oxígeno continúan durante un periodo lo suficientemente largo para medir una variación significativa en la concentración de oxígeno en el depósito (entre 3% y 5%). En los relaves reactivos expuestos, la prueba suele tomar entre 2 y 6 horas; en los relaves cubiertos este periodo puede ser hasta de 5 días. Se coloca un sensor de control de oxígeno en una caja aislada y se realizan mediciones simultáneas con los dos sensores durante la prueba. Con este sensor de control se puede aplicar una corrección en las mediciones tomadas en el depósito para representar las fluctuaciones durante las pruebas causadas por diferentes factores, tales como la temperatura ambiental y las variaciones de presión atmosférica (Tibble 1997; Bussièrè et al. 2002; Mbonimpa et al. 2002). Una vez que se completa la prueba, se toman y se analizan las muestras de los materiales probados (es decir, el material de cobertura o los relaves) a fin de obtener algunas propiedades necesarias y útiles para interpretar la prueba (curvas de distribución del tamaño de partícula, densidad relativa de los granos sólidos D_r , porosidad in situ n y contenido volumétrico de agua in situ θ). Los cilindros sólo se utilizan una vez para evitar modificar el flujo lateral del agua en las diferentes capas.

Debido a la duración de la prueba MOC, la hipótesis de las condiciones continuas utilizadas en la prueba de consumo de oxígeno estándar ya no es válida. Para calcular el flujo a través de la cobertura con el método de MOC es necesario utilizar modelamiento numérico. En este caso, las condiciones unidimensionales del límite son el depósito original con una concentración inicial de oxígeno C_0 (20,9 % o 8,71 mol O_2/m^3 de aire) y el consumo instantáneo de oxígeno por los relaves sulfurados en la base. Se puede pronosticar la variación en la concentración de oxígeno en el depósito

original con el tiempo $C_h(t)$ (véanse más detalles en Bussi re et al. 2002). Para calcular la evolución de la concentración en la cámara de aire se necesitan algunas propiedades de los suelos, tales como la porosidad y el coeficiente de difusión D_e . Mediante la comparación de la concentración de oxígeno simulada y medida en la cámara de aire se pueden determinar los parámetros que mejor se adecuan entre los resultados medidos y los pronosticados. Los parámetros más adecuados pueden utilizarse posteriormente para calcular el flujo de oxígeno a través de la CCBE. Se pueden encontrar más detalles sobre este nuevo enfoque en Bussi re et al. (2002) y Dagenais (2005).

Figura 5-26 Representación Esquemática de la Prueba Modificada de Consumo de Oxígeno



Representación esquemática de la prueba modificada de consumo de oxígeno en a) relaves expuestos; b) relaves cubiertos con una CCBE (adaptado de Bussi re et al. 2002).

5.6.2 Método de la Gradiente de Oxígeno

También se puede evaluar el flujo de oxígeno a través de la cobertura mediante el método de la gradiente de oxígeno. El uso de este método incluye la medición de la concentración de oxígeno a diferentes profundidades en la cobertura y en los relaves (Yanful et al. 1999). Luego se puede modelar el perfil medido con un software que resuelve la ecuación para el transporte del contaminante y se puede calcular D_e de las diferentes capas. Con estos valores D_e se puede calcular el flujo de oxígeno a través de la cobertura mediante la primera ley de Fick.

Existen diferentes técnicas para medir la concentración de oxígeno en un suelo:

- Método de la sonda de bastón: este método consiste en insertar una sonda de bastón en el suelo (a la profundidad deseada) y luego extraer el gas. Dicha extracción debe realizarse mediante bombeo, con una jeringa o utilizando un material absorbente que atrape el gas en sus poros.
- Método del sensor: este método consiste en enterrar un material absorbente en el suelo durante unos días. Luego se recupera el sensor y se analiza en el laboratorio después de la desorción térmica o la extracción química.

Después de la recolección, se puede analizar la muestra de gas o el sensor en el campo o en el laboratorio:

- Las mediciones de campo se pueden realizar utilizando tubos colorimétricos o utilizando cromatografía de gas portátil (detector de ionización de llama - /FID, detector de fotoionización – PID, detector de captura de electrones – EDC u otros);
- Las mediciones en el laboratorio se pueden realizar ya sea para gases adsorbidos en carbón activado, tenax, grafito, sílice, resinas (después de la desorción térmica o química) o para gases almacenados en bolsas o en bulbos, mediante cromatografía de gases (detectores de ionización de llama, captura de electrones o fotoionización) o mediante espectrometría de masa.

En Harries y Ritchie (1985), Elberling et al. (1994), Elberling y Damgaard (2001) y Vigneault et al. (2001) se pueden encontrar ejemplos de los resultados obtenidos con este método, el cual requiere varias muestras para definir la gradiente de oxígeno. La naturaleza espacial y transitoria de la gradiente de oxígeno origina también algunas dudas en la interpretación de las mediciones. (Rolston 1986; Ullom 1995).

5.7 Comentarios Finales

El monitoreo del desempeño de un sistema de cobertura construido para limitar la generación del DAM es importante a fin de verificar si se alcanza el desempeño esperado en la etapa de diseño. Las secciones anteriores presentaron los diferentes equipos disponibles para monitorear los principales parámetros necesarios para evaluar el desempeño.

Otro aspecto fundamental es la ubicación de las estaciones de monitoreo. El sistema de cobertura se divide primero en zonas donde la cobertura se puede considerar «homogénea». Por ejemplo, las zonas inclinadas se consideran como zonas distintas comparadas con las áreas planas. Es similar al caso donde se utilizaron diferentes materiales de retención de humedad durante la construcción de la cobertura. De ahí que cada zona debe ser apropiadamente monitoreada y analizada por separado.

No existe una regla clara en relación con el número de estaciones de monitoreo para un sistema de cobertura. Diferentes parámetros afectarán la densidad del monitoreo en un sitio dado: el número de zonas, el presupuesto, las leyes del país, etc. Por ejemplo, (véanse más detalles de cada sitio en el Capítulo 7), el sitio LTA tiene 50 estaciones de monitoreo (mediciones θ y ψ) para una cobertura de 66 ha, el sitio de Equity Silver tiene 15 puntos de medición de θ y ψ para un sitio de 100 ha; la cobertura de Goldstrike tiene 9 estaciones de monitoreo (mediciones θ y ψ) para un sitio de 170 ha y el sitio de Lorraine tiene 20 estaciones de monitoreo (mediciones θ y ψ) para un sitio de 15 ha.

En la bibliografía también se encuentran disponibles las frecuencias de medición. Típicamente las frecuencias de medición θ y ψ suelen ser mensuales (no hay

mediciones durante el invierno), las frecuencias de medición para parámetros meteorológicos son menores de una vez por día y las pruebas de consumo de oxígeno se hacen anualmente. También es frecuente encontrar periodos de monitoreo más intensivo que ayudan a entender el comportamiento a corto plazo y la variabilidad típica de las mediciones.

Finalmente, también parece ser importante integrar estudios sobre la vegetación y excavaciones de raíces en el programa de monitoreo de un sistema de cobertura, ya que la vegetación puede tener efectos beneficiosos (incrementa la transferencia de agua a la atmósfera, reduce la erosión acuática y eólica) o perjudiciales (deterioro de la capa de retención de humedad en la CCBE) en los sistemas de cobertura. Se deben desarrollar e implementar métodos sistemáticos tales como los propuestos por Trépanier et al. (2006) para evaluar la evolución de la vegetación y el impacto de la intrusión de raíces.

6 LA REVEGETACIÓN DE COBERTURAS DE DEPÓSITOS DE RELAVES Y ROCAS DE DESMONTE

6.1 Objetivos

La revegetación de coberturas de rocas de desmonte y relaves es la búsqueda de medidas que disminuyan el riesgo de erosión o contaminación por lixiviados en estas áreas tratadas, y en la integración de estas obras realizadas con el entorno ecológico y paisajístico.

La revegetación de coberturas de canchas de relaves y rocas de desmonte debería proporcionar a estas áreas las condiciones ecosistémicas que potencialmente lo dejarían apto para otros uso.

El principal objetivo de la revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte es que se logre cubrir el 100% del área tratada, o sea la revegetación es un proceso continuo, esto puede durar 5 años, durante los cuales no se permite el ingreso ni de personas ni animales al área de tratamiento. Es la única forma de evitar que la erosión comience.

La efectividad del uso de plantas depende del clima y del comportamiento de la evapotranspiración como forma de control de la lixiviación.

Otro aspecto de importancia esta asociado con la planificación previa respecto a cual será el uso de las tierras rehabilitadas con revegetación.

6.2 Principales Ventajas, Funciones y Dificultades que tienen la Vegetación en los Programas de Revegetación de Coberturas

6.2.1 Ventajas del Uso de la Vegetación

- Multifuncional
- Relativamente económica
- Se autorepara
- Es visualmente atractiva
- Ayuda el medio ambiente
- La revegetación con plantas nativas es un elemento muy importante

6.2.2 Funciones de la Vegetación

a) Efectos de las plantas en el refuerzo del suelo:

- Las raíces y el follaje aíslan el suelo de las fuerzas de tracción directa ocasionadas por el flujo del agua de escorrentía
- Las raíces refuerzan el suelo aumentando la resistencia al corte (fricción y cohesión) y la resistencia a las fuerzas de erosión

Revegetación de Coberturas

- Las raíces forman una red densa entrelazada en los primeros 30 cm. del suelo y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.
- b) Efectos hidrológicos de la vegetación:
- Intercepción de las gotas de lluvia: impide el impacto sobre el suelo, amortigua la energía de las gotas, parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada,
 - Parte alcanza la tierra por goteo por flujo sobre las hojas
 - Retención del agua de lluvia depende de: la intensidad de la lluvia, tipo de vegetación y follaje
 - Evapotranspiración
 - Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo y condiciones de humedad tienen un determinado potencial de evapotranspiración. Los efectos de la evapotranspiración son: Profundizar el nivel freático, producir asentamientos en suelos arcillosos blandos y el riesgo de producir agrietamientos por socavación.

e.g.: .Durante un día soleado un árbol de eucalipto puede extraer hasta 100 litros de agua
Un pasto puede extraer hasta 1 litro por metro cuadrado

- Escurrimiento por el follaje: Ocurre en hojas con pendientes entre 30° y 70° (pastos), disminuye la energía de impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo.
 - Una cobertura vegetal muy alta sin una cobertura vegetal complementaria superficial representa una amenaza de erosión.
- c) Efectos hidráulicos:
- El efecto de la vegetación es importante al crear rugosidad sobre la superficie del suelo lo cual dificulta el movimiento del agua en las laderas

6.2.3 Limitaciones que se tiene el uso de plantas en programa de revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte

- Dificultad para el establecimiento de la vegetación en caso de pendientes altas.
- Escasez de semilla en el mercado local, es difícil conseguir semilla particularmente de especies nativas.
- Susceptibilidad a quemadas, debido a que es una práctica común en la zona altoandina..
- Susceptibilidad a las sequías, particularmente las especies introducidas son exigentes en agua y requieren de riego para un buen establecimiento.
- Baja resistencia a la socavación
- Lentitud de germinación y crecimiento
- Se tiene menos experiencia
- Con frecuencia son retiradas por los animales, pues representan su alimento

Las ovejas no permiten el buen establecimiento de la vegetación, ellas arrancan el pasto ocasionando daños graves a la planta y dejando descubierto el suelo, el cual luego es dañado por la erosión.

Se debe prohibir el ingreso de estos animales a las áreas revegetadas.

Pueden generar inestabilidad debido por ejemplo a las siguientes razones:

Revegetación de Coberturas

- El secamiento del suelo por especies de alto requerimiento de agua puede producir agrietamiento especialmente en suelos expansivos.
- La turbulencia puede provocar erosión.

Foto 6-1 Quema de Pastos en Zonas Altoandinas



Foto 6-2 Sobrepastoreo de Pastos por Ovejas



6.3 El proceso de Revegetación de Coberturas de Relaves y Rocas de Desmonte

Durante el proceso de revegetación de canchas de relave y rocas de desmonte se debe tener en cuenta las siguientes actividades:

- Determinación del uso de la tierra previo y post actividad minera
- Retiro, almacenamiento y mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a ser utilizado en revegetación de coberturas de rocas de desmonte y relave
- Selección de especies de plantas utilizadas en programas de revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte en el Perú.
 - requerimientos de suelo
 - requerimientos de clima
 - principales métodos de propagación

6.3.1 Determinación del Uso de la Tierra

Una de las primeras etapas para realizar la revegetación de un área afectada por las actividades mineras es tener presente el uso que tenían las tierras antes y determinar el uso que tendrá la tierra al finalizar dichas actividades. Todas las áreas afectadas por la minería deben restaurarse oportunamente, de manera que mantengan algunos de los usos que tenían antes del inicio de la actividad minera, o un uso alternativo similar o mejor al que tenían antes. La definición del uso de la tierra dictara el tipo de revegetación, así como las prácticas de revegetación específicas.

Retiro, almacenamiento y mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo superficial (topsoil) a ser utilizado en la revegetación de coberturas de rocas de desmonte y relave

El retiro de la capa superficial de suelo y almacenamiento deben efectuarse con cuidado, especialmente con la capa de tierra vegetal para evitar su deterioro por compactación y de esta manera preservar la estructura del suelo, evitar la muerte de microorganismos aerobios, riesgo de contaminación por sustancias ácidas o tóxicas, alteración del ciclo normal de los compuestos nitrogenados, riesgo de erosión hídrica o eólica.

Tabla 6-1 Altura del Topsoil para ser Almacenado y Evitar su Compactación

Tipo de suelo	Altura del montón (m)	Período de tiempo (meses)
Ligeramente arenosos	2.4	12
franco arcillosos	1.4	12
Franco arcillosos	1.2	9
Muy arcillosos	0.9	6

Fuente: (Instituto Tecnológico geoMinero de España, 1996).

Como medidas básicas para prevenir esta compactación, se aconsejan las siguientes prácticas:

Revegetación de Coberturas

- Manipular la tierra cuando este seca o cuando el contenido de humedad sea menor de 75%, de acuerdo al tipo de suelo si es arcilloso y esta muy húmedo es demasiado difícil de poder trabajar por que se pega a las herramientas
- Evitar el paso reiterado de maquinaria sobre ella
- Depositar estos materiales en capas delgadas evitando la formación de grandes montones ($h < 3m$). La altura de los mismos, así como el periodo de tiempo que pueden permanecer acopiados, dependen de la textura

Esta recomendación no se utiliza en el Perú.

Solo debe apilar cuando sea impracticable una recuperación progresiva del terreno que permita transferirlas continuamente desde su posición original a la recuperación o tratamiento de un área en proceso de cierre. Este tipo de restauración progresiva e beneficiosa tanto desde un punto de vista económico como biológico, ya que por un lado evita el incremento del costo que supone mover dos veces el mismo material y por otro reduce el riesgo de deterioro de las propiedades edáficas.

En caso de almacenamiento los materiales deben ser protegidos del viento y de la erosión hídrica, de la compactación y de contaminantes que alteren su capacidad para sostener vegetación. Los suelos ligeramente arenosos sufrirán menos peligro en el apilamiento que los suelos arcillosos.

Estudiar los posibles sitios donde se debe ubicar el acopio y proceder a su selección, teniendo en cuenta: el relieve, la longitud de la pendiente, inclinación, condiciones de drenaje superficial e interno, riesgo de inundación y susceptibilidad a deslizamientos

Si los montones acopiados no son utilizados para la rehabilitación del suelo en un periodo corto de tiempo (menos de 1 año) puede ser aconsejable sembrar dicha superficie (restauración temporal) con una mezcla de semillas, mayoritariamente de leguminosas, y añadir paja para mantener la estructura de los montones, evitar la reducción de oxígeno y cambios adversos de la fertilidad y protegerlos contra la erosión hídrica, eólica y contaminación.

6.3.2 Extendido del suelo superficial antes de la revegetación

El extendido de este material debe realizarse sobre el terreno ya remodelado, con los cuidados del caso para evitar una mínima compactación.

El material recolocado deberá adoptar una morfología similar a la original. El extendido debe efectuarse de forma que se consiga un espesor aproximadamente uniforme en concordancia con el uso posterior del terreno, la pendiente, la red de drenaje.

Debe evitarse el paso de maquinaria pesada sobre el material extendido.

6.3.3 Mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a ser utilizado en la revegetación

Recuperación de propiedades físicas

Los suelos superficiales compactados (particularmente los materiales arcillosos) aumentan su densidad, que puede restringir el crecimiento de las raíces y reducir el movimiento del aire y agua. Las densidades de suelo que son limitantes en el crecimiento de las plantas, depende de la textura. Normalmente el crecimiento de las raíces esta limitado cuando la densidad del suelo llega a ser mayor de $1,5 \text{ g/cm}^3$ en

Revegetación de Coberturas

suelos de texturas finas (arcillas y limos). En suelo de texturas gruesas arenosas las densidades por encima de 1.7 g/cm^3 son las restrictivas.

Para realizar un proceso de revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte es necesario mejorar en primer lugar las condiciones físicas del suelo: estabilidad, aireación, infiltración y retención de humedad, para lo cual es común el uso de materiales orgánicos de la zona como musgo (turba), estiércoles, e compost. La adición de materia orgánica a los suelos incrementará la infiltración, el drenaje y la aeración y reducirá el efecto de encostramiento de la superficie de los suelos que es beneficiosa para establecer el contacto semilla-suelo para una apropiada germinación.

La erosión de las tierras disturbadas ubicadas en laderas, especialmente, durante los primeros años siguientes a la revegetación puede ser un factor primordial que limite el éxito de la restauración. Hay dos formas de erosión como resultado de la escorrentía. La primera; erosión laminar, originada por la dispersión de gotas de lluvia y el movimiento del agua en capas poco profundas y; la erosión en surcos o cárcavas, resultado de un flujo de agua canalizado hacia cursos de agua definidos. El control de la erosión durante la fase de revegetación podría ser el periodo más crítico para asegurar el éxito de la restauración.

Cuando se extienda el suelo superficial se debe tratar de nivelar el terreno de tal manera que haya una adecuada evacuación de agua, así como el control de la erosión y sedimentación, lo cual se logra con un 10% de pendiente (Wilson, 1985).

Corrección del pH del suelo mediante el encalado

Se debe corregir la reacción del suelo, en el caso de que el suelo sea fuertemente ácido (pH menor de 5.5) mediante la aplicación de enmiendas calcáreas (caliza, dolomita) con la finalidad de favorecer el crecimiento de las plantas y de los microorganismos los cuales necesitan de calcio; además también es importante para neutralizar algunos elementos potencialmente tóxicos que podrían ser absorbidos por las plantas en suelos ácidos y se podrían bioacumular en el follaje de los pastos con los riesgos potenciales que esto representa para la alimentación animal.

Para determinar los requerimientos de encalado del suelo superficial a ser utilizado en programas de revegetación se debe tener en cuenta la textura, la cantidad de materia orgánica del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y el pH inicial del suelo.

De acuerdo a las experiencias en el Perú, se ha determinado que las cantidades que se recomiendan para el encalado de este tipo de suelo varía de 1 a 3 toneladas de caliza/hectárea, lográndose con esta práctica elevar el pH a valores superiores a 5.5.

La utilización de enmiendas eleva los costos de instalación, pues requiere de grandes cantidades. Por ello se recomienda reemplazar estos abonos por productos de efecto similar, pero a costos más bajos, tal es el caso del compost o tierra negra de buena calidad de zonas próximas al lugar.

Mejoramiento de la fertilidad del suelo y disponibilidad de nutrientes

El material recuperado de la capa superficial del suelo, (topsoil) que será utilizado para la revegetación de coberturas debe muestrearse para caracterizar las principales propiedades físicas y químicas. El muestreo y análisis de estos materiales debe realizarse en los seis meses previos a la siembra de vegetación. El número de muestras colectadas y la profundidad del muestreo debe ser el apropiado para representar el material muestreado. Esto variará dependiendo de la complejidad y variabilidad del

material. El muestreo del suelo puede realizarse con siguiendo el método sistémico al azar.

El material de la capa superficial debe muestrearse después de la redistribución o extensión sobre la superficie para registrar los cambios que hayan ocurrido mientras la capa superficial estuvo almacenada, debe muestrearse a una profundidad en la que se espera ocurra la mayor parte de penetración de raíces.

En los materiales de la capa superficial deben analizarse los siguientes parámetros: pH, porcentaje de materia orgánica, conductividad eléctrica, tasa de adsorción de sodio (si se sospecha que existe el problema), análisis de tamaño de partículas, nitrógeno-nitrato, fósforo y potasio disponibles para la planta. Si se sospecha que la concentración de otros metales es elevada, éstos también deben ser analizados.

La deficiencia de nutrientes esenciales par el crecimiento de las plantas es común en los suelos superficiales a ser utilizados en la cobertura de relaves y rocas de desmonte.

Las deficiencias más comunes son la falta de nitrógeno y fósforo particularmente en suelos fuertemente ácidos ($\text{pH} < 5.5$). El potasio, es comúnmente deficiente en suelos de textura gruesa -y moderadamente gruesa- y de baja capacidad de intercambio catiónico. Las deficiencias de calcio, magnesio, azufre y micro-nutrientes son menos comunes, pero pueden presentarse en suelos con bajo contenido de materia orgánica, textura gruesa o en los suelos muy erosionados.

El límite de la cantidad de N aplicado dependerá de las condiciones del suelo y de las prácticas agronómicas. Se debe tener cuidado al formular recomendaciones para fertilizar con N. Los análisis de suelos deberían incluir la determinación de N-NO_3 . En general, los suelos con un nivel de P disponible de 7 ppm son adecuados para una revegetación exitosa. También se debe analizar el potasio (K) disponible para la planta. Los suelos con más de 0,2 meq de K intercambiable/100 g de suelo son generalmente adecuados.

Mejoramiento de las propiedades biológicas del suelo

La mejor manera para restablecer una comunidad microbiana en el suelo es aplicar una capa superficial de suelo al sitio disturbado que contenga una población viable y diversa de microbios. Tierra fresca sacada justo antes de la siembra. Otras fuentes microbianas incluyen el estiércol o el compost que podrían ser aplicado para proporcionar un inóculo del cual se puede originar una población microbiana.

También se podría utilizar el follaje de especies forestales como fuente de abono directo por e.g., el aliso (*alnus jorullensis*), por ser la especie altoandinas cuyo follaje es empleado como abono y como fuente de tierra compostada (Reynel y Felipe Morales, 1987). Además este árbol "aliso", fertiliza los pastos con el nitrógeno que proporcionan la simbiosis radicular con el actinomiceto del género Frankia. Otras especies adecuadas para la producción de abono en los bosquetes son: "quisuar" (*Buddleja incana*), "colle" (*Buddleja coriacea*), "quinual" (*polilepys incana*), "molle" (*Schinus molle*).

6.4 Selección de Especies de Plantas

La distribución natural de las plantas se controla principalmente por el clima y, secundariamente, por los factores del suelo. Los factores limitantes que controlan la distribución de las plantas se acentúan en climas secos o fríos donde la variabilidad

Revegetación de Coberturas

estacional de temperatura y humedad es más crítica, como ocurre en las zonas altoandinas.

En el siguiente Tabla 6-2 se indican las consideraciones generales que limitan de manera frecuente el crecimiento de las plantas en los programas de revegetación de coberturas de relaves.

Tabla 6-2 Algunas Consideraciones para la Selección de Especies de Plantas

Condiciones Primarias	Tipo de Planta
Tipo de Residuo	
Metales tóxicos en alta concentración	Plantas tolerantes a los metales Por ejemplo <i>Senecio</i> en las zonas altoandinas. Colonizadores naturales de áreas mineralizas.
Acidez y alcalinidad extrema Deficiencias de nutrientes	Colonizadores naturales de estos medios Leguminosas u otras plantas fijadoras de nitrógeno e.g., <i>Aliso</i> , <i>tarhui</i>
Clima	
Fríos extremos con un periodo de corto crecimiento	Especies nativas o introducidas de rápido crecimiento (<i>treboles</i> , <i>festucas</i>)
Condiciones áridas o semiáridas	Especies nativas o introducidas de lento crecimiento
Condiciones templadas	Especies agrícolas o forestales dependiendo del tipo de rehabilitación
Uso del Suelo	
Para rápida estabilización y alta productividad Para vida silvestre	Especies agrícolas (avena forrajera) Variedades de especies nativas, que provean semilla, fruta, y espacios de protección y anidación
Para espacios de recreación	Especies resistentes a la intervención antropica

De acuerdo a las experiencias realizadas en el Perú, para la revegetación de coberturas de relaves en las zonas altoandinas se indica que las especies vegetales a ser empleadas deben ser de preferencia especies herbáceas y en segundo caso arbustivas. Inclusive en el caso de las especies herbáceas se debe procurar no utilizar aquellas que tengan raíces profundas como el caso de la alfalfa (*Medicago sativa*) (Pineda, E. 1999) según Florez y Malpartida (1987).

Las características que debe reunir una buena planta forrajera son: apetecibilidad, contenido alimenticio y digestibilidad, inocuidad, alto rendimiento perenne y rústica. De estas características, las dos primeras están estrechamente relacionadas al objetivo de conseguir una adecuada alimentación del ganado. Las otras características si corresponden en cambio, a los objetivos que se pretenden conseguir en una revegetación.

Para Farfan y Durant (1998) los aspectos que se deben tener en cuenta al momento de decidir por la instalación de pastos cultivados son:

- Alta producción anual de forraje,
- Larga y productiva duración
- Lugar apropiado para las plantas deseadas
- Bajas inversiones iniciales para el sistema de riego y bajos costos de mantenimiento
- Producción de forraje en época seca,
- Alta calidad de forraje,
- Aprovechamiento del pasto por largo tiempo

De estos aspectos la alta calidad del forraje no es imprescindible para el caso de la revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte.

En las áreas de relaves que han sido revegetadas con pastos si es posible la introducción del ganado para una fase posterior. Este aprovechamiento no es riesgoso si las áreas revegetadas tienen buen manejo y sobre todo si estas se han establecido sobre una geomembrana (Valdivia, H., 2000).

6.4.1 Requerimientos de Suelo

En primer lugar hay que tener en cuenta las características del suelo desde el punto de vista físico como son la pendiente, la profundidad, la pedregosidad superficial y la capacidad de retención de humedad. Luego se deben considerar las propiedades químicas tales como pH, disponibilidad de nutrientes, cantidad de materia orgánica, etc. Los cuales representan los principales parámetros que determinan el adecuado crecimiento de las plantas, la selección del método de siembra o plantación.

A continuación se presenta una tabla resumen indicando las características de suelo mas importantes que deben tenerse en cuenta para la instalación de plantas en las coberturas de relaves y rocas de desmonte

La profundidad del suelo se califica considerando los siguientes términos: “**escasa**” cuando es menor de 15 cm; “**media**” de 15 a 40 cm, “**alta**” cuando es mayor de 40 cm.

La pedregosidad superficial es otro problema común en los suelos superficiales destinados a revegetación y se califica indicando “**baja**” menos de 10%; “**media**” de 10 a 60% y “**alta**” cuando ocupa más del 60% de la superficie.

6.4.2 Requerimientos Climáticos

El clima es el factor mas determinante para la selección de las especies de plantas que se van a seleccionar para la revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte, considerando que las actividades mineras están ubicadas principalmente en las zonas altas de los andes, donde el clima es generalmente frígido a templado frío, con un régimen de distribución de lluvias escasas e irregulares, y con cierta frecuencia de sequías y heladas, represente en muchos casos el factor mas limitante.

Se denomina helada a un evento climático que ocurre cuando la temperatura del aire cercano a la superficie del terreno disminuye a 0°C o menos, durante un tiempo mayor a cuatro horas. Generalmente la helada se presenta en la madrugada o cuando está saliendo el Sol

La severidad de una helada depende de la disminución de la temperatura del aire y de la resistencia de los seres vivos a ella.

La calificación de resistencia de las plantas a las heladas con el termino “**soporta**” heladas significa que las especies pueden sobrevivir hasta 30 días de helada/año

La calificación de la resistencia a heladas con el término “**eventual**” significa que las especies pueden soportar hasta 15 días de heladas por año.

El requerimiento de agua se califica como “**Bajo**” y es **tolerante a la sequía** cuando crece con 200 mm de precipitación anual “**medio**” cuando crece con una precipitación entre 200 y 800 mm y “**alto**” cuando el requerimiento es mayor de 800 mm (sensible a la sequía).

Tabla 6-3 Requerimientos de suelo para las especies mas utilizadas en programas de revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte

ESPECIE	REQUERIMIENTOS DE SUELO					CONDICIONES FAVORABLES
	TEXTURA	PROFUNDIDAD	REACCION (pH)	CONDICIONES ADVERSAS		
PASTOS NATIVOS ALTOANDINOS						
<i>Festuca dolichophylla</i> (Chillihua)	Franco y franco limosos	"Media"	5.8 a 7.87	Suelos fuertemente ácidos con bajo contenido de materia orgánica y arcillosos	Crece bien en suelos ricos en materia orgánica, con alto contenido de calcio y potasio	
<i>Calamagrostis vicunarum</i>	Franco limosos	"escasa" (0-15 cm) y media	Suelos ácidos pH menor 5.5	Es muy rustica y se adapta a suelos pobres	Crece bien en suelos de buen drenaje, de textura media	
<i>Stipa ichu</i>	franco	"escasa" (0-15cm)	Suelos ácidos pH menor 5.5	Mal drenaje	Es muy rustica y se adapta a suelos muy pobres	
<i>Muhlenbergia fastiagata</i> "grama"	Media a fina	"escasa" (0-15cm)	Ligeramente ácidos pH 5.5 – 6.5	Suelos con buen drenaje	Crece bien en suelos húmedos (mal drenaje), oconales, o bofedales	
PASTOS CULTIVADOS						
<i>Lolium perenne</i> (nve grass ingles)	Variada	escasa	Variada	Suelos muy bien drenados	Se adapta a todo tipo de suelos pero requiere abonamiento y agua	
<i>Lolium multiflorum</i> (nve gras italiano)	Variado	escasa	Variado	Suelos arenosos, que se secan rápidamente	Se adapta a suelos superficiales pero que tengan adecuado suministro de agua	
<i>Trifolium pratense</i> (trebol rojo)	Franco	escasa	Mayor de 6.5	Suelos ácidos pH <5.5	Suelos con buen drenaje y buen contenido de calcio por ser leguminosa mejora la	
<i>Trifolium repens</i> (trebol blanco)	Variada	escasa	Variada	Suelos pegregosos	Se adapta a todo tipo de suelos es muy rústico	
<i>Dactylis glomerata</i> (Pasto ovillo)	Media a ligera	media (hasta 40 cm)	variado	Suelos mal drenaje	Se adapta a diferentes tipos de suelos pero requiere que haya muy buen drenaje	
ARBOLES Y ARBUSTOS						
<i>Polylepis incana</i> H.B.K. Queñual	Variable	Media a escasa (hasta 40 cm.)	Neutro o Alcalina pH>7.0	Suelos acidos	Requiere suelos con muy buen drenaje, tolera la pedregosidad	
<i>Polylepis racemosa</i> R. & P. Queñual	Franco y franco arcillosa	Media a escasa (hasta 40 cm.)	Neutro o Alcalina pH>7.0	Suelos acidos	Crece en suelos pobres; tolera la pedregosidad elevada	
<i>Buddleia incana</i> R. et P. Cuelle o quishuar Quisuar	Franco a franco arenoso	Media a escasa (hasta 40 cm.)	Neutro a Alcalino pH>7.0	Suelos muy drenados y secos y ácidos	Es una especie plástica y adaptable, tolera cierta pedregosidad	
<i>Dodonaea viscosa</i> Jacquin Chamisa, chamama	Arenoso, franco arenoso	Media a escasa (hasta 40 cm)	Suelos neutros y ácidos (pH < 7.0)	Suelos alcalinos	Es fácil de reconocer, especie rustica y adaptable en suelos de variada condición	

Tabla 6-4 Requerimientos de suelo para las especies mas utilizadas en programas de revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte

ESPECIE	REQUERIMIENTOS CLIMATICOS				CONDICIONES
	ALTITUD	TEMPERATURA	REQUERIMIENTOS DE AGUA	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	
PASTOS NATIVOS ALTOANDINOS					
<i>Festuca dolichophila</i> (Chillihua)	3800 a 4000 msnm	"soporta" heladas	Bajo – soporta sequías (menos 250 mm por año)	Principalmente en la Sierra Central y sur del Perú	Es una pastura que tolera a las sequías y heladas
<i>Calamagrostis vicunarium</i>	3800 a 4700	"soporta" heladas	Bajo – soporta sequías	Sierra Central y sur del Perú	Es una pastura que tolera a las sequías y heladas
<i>Stipa ichu</i>	3500 a 5000	"soporta" heladas	Bajo – soporta sequías	En toda la sierra del Perú	Es una planta que se desarrolla en las heladas
<i>Muhlenbergia gastagata</i>	3600 a 4300	"soporta" heladas	Abundante	En las mesetas altoandinas del Perú	Se distribuye de preferencia en los lugares helados
<i>Poa candamona</i> "Kcacho"	3700 a 3900 msnm	"Soporta" heladas		Sierra Central del Perú	
PASTOS CULTIVADOS					
<i>Lolium perenne</i> (ray grass ingles)	2500 a 4000 msnm	Eventual	Abundante	Desde Cajamarca hasta Puno	Necesita riegos frecuentes y ligeros
<i>Lolium multiflorum</i> (ray grass italiano)	2500 a 4000 msnm	Eventual	Abundante	Desde Cajamarca hasta Puno	Necesita riegos frecuentes y ligeros
<i>Trifolium pratense</i> (trebol rojo)	2500 a 4500 msnm	Sensible a heladas	Abundante Sensible a las sequías	Desde Cajamarca hasta Puno	Requerimiento hidrico frecuente, mejora la fertilidad del suelo por se leguminosa fija nitrógeno atmosférico
<i>Trifolium repens</i> (trebol blanco)	2500 a 4500 msnm	"soporta" heladas	Bajo		Tolerante a sequías y heladas y mejora la fertilidad del suelo por se leguminosa fija nitrógeno atmosférico
<i>Dactylis glomerata</i> (Pasto ovillo)	2500 a 4500 msnm	Eventual	Medio a bajo		Soporta bien las sequías y tiene buen enraizamiento
ARBOLES Y ARBUSTOS					
<i>Polylepis incana</i> H.B.K. Queñual	2800 a 5000 msnm	<3°C a 12°C Soporta heladas	Bajo	Los andes del Centro y sur del Perú	parte alta de las cuencas altoandinas del centro del Perú.
<i>Polylepis racemosa</i> R. & P. Queñual	2600 a 4000 msnm	6 a 14°C	Medio a alto	Ubicada solo en el valle del Mantaro y adyacentes	Clima estacional templado húmedo
<i>Buddleia incana</i> R. et P. Ccolle o quishuar, Quisuar	2300 a 3400 msnm	9 a 17 °C Resistencia a heladas eventual	bajo	-	En la primera etapa de crecimiento requiere de cuidados
<i>Dodonaea viscosa</i> Jacquin Chamisa, chamana	1000 a 3000 msnm	10 a 20°C Soporta heladas	Bajo	Cajamarca, Ancash y en el Valle de Mantaro	Muy bueno para conservación de suelos en zonas altoandinas con escasez de agua

Revegetación de Coberturas

A continuación se presenta una tabla resumen indicando las principales limitaciones climáticas para plantas que se utilizan en la revegetación de coberturas de relaves y rocas de desmonte.

6.4.3 Principales Métodos de Propagación

La propagación de los pastos locales nativos de zonas altoandinas (Ichu, chillihua, Calamagrostis, poas, etc) tienen semillas botánicas de muy bajo poder germinativo y viabilidad muy baja, por lo cual el principal método de propagación es mediante esquejes o hijuelos, generalmente enraizados, que se sacan de plantas madres que se encuentran bien conformadas. Entonces se siembran mediante el trasplante de estos esquejes al inicio de las lluvias y generalmente utilizando practicas de conservación de suelos como zanjas de infiltración. (Flores, 2004; Salaverry, 1995)

En cambio los pastos cultivados que han sido introducidos de otras zonas e incluso de otros países (Ray grass, Dactilis, tréboles, etc.) pero que han demostrado una buena adaptación para las zonas altoandinas se propagan principalmente utilizando semilla botánica, de muy buen poder de germinación y viabilidad, por lo cual se siembran generalmente de manera directa: al voleo, en hileras o mediante hidrosiembra.

6.5 Sistemas de Plantación

Existen las siguientes formas de realizar la siembra de pastos en coberturas de depósitos de relaves o rocas

- Siembra directa en hileras
- Siembra directa al voleo
- Siembra directa – hidrosiembra para taludes
- Trasplante: Siembra indirecta utilizando esquejes o hijuelos enraizados de pastos

Tabla 6-5 Limitaciones para Siembra de Pastos con Diferentes Sistemas de Plantación en Hileras, al Voleo e Hidrosiembra

Factor	Siembra en Hileras	Siembra al Voleo	Hidrosiembra
Pendiente	<15°	No se puede actuar en pendientes mayores de 20°	Con manguera se puede alcanzar 50 m y con brazo mecánico extensible hasta 500m
Precipitación	Importante	Critica	Critica
Pedregosidad o afloramientos rocosos	Libre de rocas y piedras	Critica, fisuras y grietas en las rocas y piedras permiten que las semillas se introduzcan y puedan encontrar mejores condiciones micro climáticas para germinar	
Compactación	Ligeramente aceptable	Inaceptable	Inaceptable
densidad de semillas	Bajas densidades	Altas densidades	
Distribución de las semillas	Uniforme en hileras	Aleatoria	Aleatoria
Establecimiento de las semillas	Muy efectiva	Resultados variables	Resultados variables
Fertilización	Operación separa de la siembra	Operación separada de la siembra	Se puede efectuar en la misma operación, pero no se realiza a profundidad
Paja	No es necesario	Necesario (operación diferente)	Necesario, se puede efectuar en una misma operación
Equipamiento	Tradicional	Método manual	Equipo especial
Costo	Bajo	Muy barato	Caro

Fuente: Coppin, N.J. and Bradshaw, A. D. 1982. "Quarry reclamation". Mining Journal Books. England.1982.

6.5.1 Dosis de Siembra y Semilla de Pastos

La siembra al voleo, esparciendo la semilla uniformemente a lo largo de una determinada superficie, se suele utilizar solamente cuando se dispone de suficiente cantidad de semilla de buena calidad y el terreno esta humedecido por las lluvias primaverales de octubre a diciembre. Se puede utilizar desde 20 a 50 kg de semilla/ha de gramíneas las cuales se pueden mezclar con 2 Kg de semilla de tréboles.

La siembra en líneas o surcos se construyen siguiendo el contorno del terreno y se colocan las semillas en el fondo del surco o línea, apisonado ligeramente en el suelo húmedo. La cantidad de semilla necesaria por este método es menor (15 a 20 kg/ha).

Cuando se compra semilla, es importante que el depósito que la contiene tenga escrito en la etiqueta el origen, el porcentaje de germinación, la fecha de la prueba de germinación, el porcentaje de semilla pura (por peso). La certificación es la única garantía para el consumidor de que la semilla adquirida es de buena calidad. Sin esta información, no es posible determinar el porcentaje exacto en el cual la semilla viable está siendo sembrada. En nuestro país no existe venta de semilla certificada para el caso de especies nativas, no hay disponibilidad, por lo cual si este es el interés se deben instalar semilleros "in situ" en la misma zona a revegetar. En el PERU la única institución con experiencia en la producción de semillas de pastos nativos es ADEFOR, la cual realiza actividades de secado, extracción, purificación, certificación, almacenamiento y comercialización.

6.5.2 Siembra Indirecta - TRANSPLANTE

Los pastos que son de la familia gramínea, particularmente los locales o nativos de las zonas altoandinas se propagan mediante la propagación asexual utilizando esquejes enraizados de plantas madres con las condiciones adecuadas de calidad de praderas altoandinas, principalmente las gramíneas como la chillihua o festuca dolichofila, ichu, calamagrostis, etc. (Figura 6-1).

En el caso de especies arbustivas o arbóreas de raíces superficiales como el quinal se transplantan utilizando esquejes o plántones enraizados en hoyos bien acondicionados de por lo menos 40 cm. de profundidad adicionándole a cada hoyo estiércol y buena tierra de chacra. Se pueden sembrar siguiendo curvas a nivel para formar barreras vivas que controlen bien la erosión, o a mayor densidad en la parte alta de algunos taludes para formar bosquetes o macizos forestales.

6.6 Manejo y monitoreo de las tierras revegetadas

El manejo apropiado de un sitio revegetado es crítico debido a su sostenibilidad a largo plazo (durante por lo menos 4 años). Junto con el muestreo de vegetación, debe hacerse observaciones de pérdida de suelo debido a la erosión eólica e hídrica. La presencia de cárcavas debería resultar en acciones específicas que prevendrán nuevas cárcavas y promoverán la estabilidad del sitio. Si la erosión no se controla, la vegetación establecida no será exitosa, se perderá el costo inicial de la rehabilitación y el sitio perturbado requerirá un nuevo tratamiento.

Si el terreno de sitio restaurado se utilizará para el pastoreo, esta actividad no se debe permitir por lo menos hasta cinco años después de realizada la revegetación. Si la

Revegetación de Coberturas

tierra es utilizada para cultivos, las plantaciones anuales y las aplicaciones anuales de fertilizantes son una parte principal del plan de manejo de un sitio.

Figura 6-1 Como Transplantar Pastos mediante Esquejes o Hijuelos (chillihua, ichu, poa, etc)



Escoger plantas madres bien conformadas, que han tenido un buen crecimiento y desarrollo



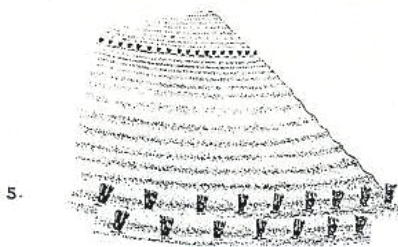
Sacar las plantas y comenzar a separar de la planta madre los esquejes que tengan un buen enraizamiento



Seleccionar los mejores esquejes o hijuelos enraizados



Se debe cortar las hojas por la mitad con la finalidad de disminuir las perdidas de agua del esqueje hasta que se establezca en el campo y comenzar a plantarlo



Sembrarlo en hileras en contra de la pendiente para ir progresivamente logrando la cobertura total del área (después de 3 a 5 años). Evitar el ingreso de ovinos u otros animales sin control.

6.7 Estudio de Casos sobre Experiencias de Revegetación de Coberturas de Relaves y Desmontes de Roca

6.7.1 Caso A: Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. - Unidad Minera Recuperada - Huancavelica

Ubicación: La Unidad Minera Recuperada se ubica en el distrito de Huachocolpa, provincia y departamento de Huancavelica. Los campamentos e instalaciones se extienden en la región Jalca o Puna, a 4 335 msnm, con cumbres que alcanzan los 5 000 msnm y quebradas a 4 200 msnm, producto de la erosión fluvial.

Clima: El clima es frígido.

Actividad: Mediana Minería - Poli metálico mineral - mina Subterránea

Área rehabilitada

Los depósitos de relaves (1 y 2) que se revegetaron, se ubican en ambas márgenes del río Pallcapampa y en las faldas de dos colinas. Por lo tanto, no tenían protección contra la erosión hídrica y eólica.

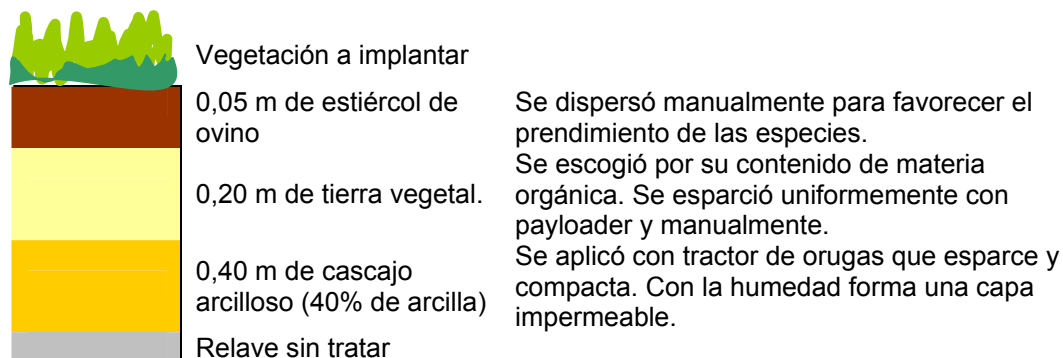
Por su origen estos relaves no piríticos (ausencia de sulfuros de hierro) y, por lo tanto, no genera Drenaje Ácido de Roca (DAR) y tienen un pH promedio: 8.

Las presas de relaves mencionadas tienen una antigüedad promedio de abandono de 20 años, estando sujetas a acciones erosivas (eólicas e hídricas). Previo al trabajo de revegetación se realizó un estudio de estabilidad física, ante un evento sísmico el comportamiento de los depósitos será satisfactorio, con la ocurrencia de ligeras deformaciones que no comprometerán la seguridad e integridad de los mismos.

Caraterísticas de la Revegetación de la cobertura de relaves

La cobertura técnica se detalla en la Figura 6-2. Debido a que el relave no tiene capacidad para generar DAR no se aplicó una barrera alcalina.

Figura 6-2 Perfil Final de la revegetación de la cobertura de los Depósitos de Relaves 1 y 2



Especies utilizadas: Se revegetó un área total a revegetar: 1,60 ha, utilizando los pastos cultivados: *Lolium perenne* (Ray grass inglés) 0,60 ha y *Dactylis glomerata* 1,00 ha

Revegetación de Coberturas

Previamente a la siembra se aplicó la primera cobertura de cascajo arcilloso, al ser compactada, cumplió la función esperada de formar una capa impermeable y evitar la infiltración. El espesor colocado se redujo a 0,30 m. Los 0,10 m restantes se mezcló con la capa superficial del relave.

La siembra se realizó al voleo en forma manual, tratando de cubrir todos los espacios posibles, para distribuir de la manera más uniforme posible los 50 kg/a de semilla, luego se rastilló el terreno para cubrir las semillas con tierra y protegerlas, antes del inicio de la época de lluvias. Así se garantizó la humedad necesaria para la germinación de las semillas.

El prendimiento se ayudó en la época de estiaje (abril – octubre) regando con agua de un camión cisterna, 2 veces por semana, de 8 a 10 a.m. Esta actividad se realizó hasta el siguiente periodo de lluvias, fecha para la que se estimó la plantación estaría establecida, con la capacidad de resistir las condiciones de temperatura y ausencia de lluvias.

La germinación de semillas de Ray grass inglés fue a los 14 días de su siembra y el Dactylis, a los 20 días, luego el Dactylis mostró mejor y mayor crecimiento foliar, habiéndose adaptado de manera más rápida que el Ray grass.

Fertilizantes: La incorporación de estiércol animal ayudó a mejorar la estructura del suelo y mejorar las condiciones de retención de humedad en los primeros meses de establecidas las semillas. Se evidenció un rápido desarrollo vegetativo en los primeros estadios, favoreciendo al recubrimiento de la plataforma rápidamente.

Erosión: Durante el periodo de lluvias se notó que la escorrentía era considerablemente menor a la que ocurría anteriormente, pudiendo ser manejada mediante la construcción de drenes diagonales en las zonas de mayor discurrimiento de las aguas.

Costos: Los costos se redujeron considerablemente al no agregar una barrera alcalina ni material impermeabilizante sintético, debido a las correctas acciones para contrarrestar la infiltración de las aguas en los relaves.

6.7.2 Caso B: Cia. Minera Milpo (Aguirre, A. y Otros. 1995)

Ubicación: La CIA Minera Milpo (MILPO) se sitúa en la cordillera central del Perú, en el distrito de Yanacancha, provincia de Cerro de Pasco, a 180 km de la Oroya y a 350 km de Lima, a una altitud de 4 200 msnm.

Clima: MILPO se ubica en la zona de vida del Páramo Pluvial sub Alpino Tropical (pp-SAT), medio que se caracteriza por precipitaciones pluviales anuales promedio de 1 784 mm y biotemperaturas entre 3 y 6 °C.

Actividad: Mediana Minería, Poli metálico Mineral - Mina Subterránea

Cronología: La revegetación se realizó en relaves abandonados no menos de 30 años.

Los relaves mineros presentan poca cantidad de elementos solubles, y la liberación de estos sería muy lenta debido al pH (7,7). Los minerales presentes tienen un comportamiento estable debido a la gran cantidad de calcita y caliza.

Revegetación de Coberturas

La cobertura técnica antes de la revegetación debido a que el relave no tiene capacidad para generar DAR no se aplicó una barrera alcalina.

Figura 6-3 Perfil Final de la revegetación de la cobertura del Depósito de Relave de Milpo



Especies utilizadas: Se utilizaron Especies arbóreas tales como: *Buddleia* spp. (Colle), *Baccharis tricuneata* (Taya), y especies forrajeras tales como *Medicago sativa* (alfalfa), *Trifolium pratense* (Trébol blanco), *Avena mantaro* (*Arrenatherum* sp.), *Dactylis glomerata* (Dactylis), *Lolium perenne* (Rey Grass inglés), *Lolium multiflorum* (Rey grass italiano).

Se propagaron plántones de colle a raíz desnuda y los de taya se recolectaron de los alrededores con una altura promedio de 25 cm. el sustrato fue una mezcla de tierra negra y tierra agrícola (proporción 1:3). Las especies forrajeras se sembraron mezclando diferentes pesos de semillas de las tres leguminosas y las cuatro gramíneas. Las semillas se sembraron en suelos de 15 cm de espesor (10 cm de suelo franco arcilloso y 5 cm de tierra negra).

Cantidad de semilla: variable de acuerdo a los tratamientos de la Tabla 6-4.

Tabla 6-6 Tratamientos de las Especies Vegetales

Pastos	Especies	Tratamientos (Kg de semilla/ha)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Leguminosas	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	15	5		5				
	Trébol blanco (<i>Trifolium repens</i>)		3	4	3	8	3		3
	Trébol rojo (<i>Trifolium pratense</i>)						5		5
Gramíneas	Avena mantaro (<i>Arrenatherum</i> sp.)			48	18				
	Dactylis (<i>Dactylis glomerata</i>)	8	8						
	Ray grass Inglés (<i>Lolium perenne</i>)					20	16		
	Ray grass Italiano (<i>Lolium multiflorum</i>)								16

Tratamiento Testigo: *Poa candamoana*

Se evaluó el crecimiento de las plantas forestales a los 27 meses y el rendimiento de los pastos a los 30 meses.

La taya (*Baccharis tricuneata*) se vio afectada negativamente en cuanto a su supervivencia luego de la plantación, estabilizándose luego en los meses siguientes.

El colle (*Buddleia* spp.) tuvo un comportamiento inverso al de la taya, pues se tuvo una buena supervivencia al inicio de la plantación, presentándose la mortandad 10 a 12 meses después. El sistema radicular de la taya es más reducido y propio de una especie arbustiva, totalmente diferente al presentado por el colle (especie arbórea),

cuyo crecimiento en altura de 5 – 8 m, tiene relación con el desarrollo del sistema radicular, mucho más amplio, que explora más el suelo e invade más relave o suelo pobre, lo cual repercute finalmente en su vigor o estado general.

La diferencia de vigor de los colles está en relación directa con el tamaño del hoyo: a mayor volumen, hay más suelo fértil con efectos marcados en el vigor de las plantas.

Pastos

La asociación de pastos trébol rojo, alfalfa y “Ray grass” presentó un alto rendimiento. Por crecer sobre suelos ricos en materia orgánica, que favorece su nutrición. También se ha demostrado que tales pastos exóticos pueden verse incrementados en su rendimiento significativamente en la medida que el suelo dispuesto sobre los relaves cuenta con la incorporación de estiércol y compost, por ello se obtuvieron altos rendimientos de forraje (de 34 a 64 TN de follaje verde por ha/año).

El pasto que garantizan una cobertura efectiva del relave es *Poa candamoana* (pasto nativo). A pesar de que se obtuvo una baja productividad este pasto mostró una cobertura eficiente del relave.

Los análisis foliares para determinar la concentración de metales descartó la presencia anormal de metales pesados en los árboles y pastos.

6.7.3 Caso C: Compañía Minera Centromin Perú en Quiulacocha

La ex laguna de Quiulacocha está situada en el distrito de Quiulacocha, departamento de Pasco, a una altitud de 4 300 msnm.

El depósito de relaves de Quiulacocha tiene una presa principal y un dique flotante intermedio de 540 metros de largo y 4 metros de altura. El depósito está construido con material compuesto de grava, limo y arena fina (saturada de agua). El total de relaves presente en la cancha es de 78 699 777 toneladas de los cuales aproximadamente el 52% corresponden a sulfuros formadores de ácido, es decir 40 923 884 toneladas.

Desde el punto de vista químico la cancha de relaves de Quiulacocha está formada básicamente de pirita, galena y escalerita en un volumen aproximado del 52%. Estos sulfuros tienen alto potencial para formar ácidos en presencia de agua. (el pH oscila entre 2,2 – 3,5). Todos los metales disueltos superan largamente el límite máximo permisible (LMP).

Debido a que el depósito está construido con material compuesto de grava, limo y arena fina (saturada de agua) y existen filtraciones, hay un riesgo de que se pueda originar una falla que desestabilizaría la presa, de 10 metros de alto y, un eventual sismo, podría ocasionar efectos nefastos en los suelos y colapsar.

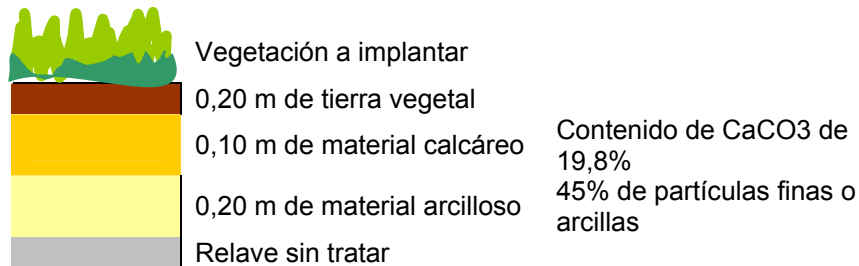
Revegetación

El área total del ex-depósito de relaves es de 141,8 hectáreas. Para la revegetación se consideró 2 208 m², distribuidos en tres lugares estratégicos: zona este, medio y oeste, con 736 m² cada una.

Como cobertura de los relaves se utilizó como sustratos arcilla, cal, caliza molida, tierra agrícola, cascajo y tierra de cerro colindante; la proporción de sustrato que demostró mayor éxito fue la siguiente:

Revegetación de Coberturas

Figura 6-4 Perfil Final de la revegetación de la cobertura del Depósito de Relaves de Quiulacocha- CENTROMIN – PERU



Especies utilizadas

Utilizando Esqueje: Stipa ichu (ichu), *Calamagrostis vicunarium*, *Festuca dolichophylla*, *Medicago sativa* (alfalfa).

Utilizando Semillas: *Trifolium pretense* (Trébol rojo), *Trifolium repens* (Trébol blanco), *Dactylis glomerata* (Dactylis), *Lolium perenne* (Ray Grass inglés), *Lolium multiflorum* (Ray grass italiano).

Preparadas las parcelas e instalado el sistema de riego se transplantó las diferentes especies de pastos en parcelas de 4 x 4 m, 4 x 8 m, y 8 x 1 m. El número total de parcelas fue de 87.

La disponibilidad de precipitación fue de 242 mm en diciembre e inicios de enero 338 mm.

En lo que respecto al rendimiento fueron mejor favorecidos los pastos cultivados en comparación con la asociación de pastos nativos. Los rendimientos oscilaron entre 24 a 32 TM/ha de forraje verde, con un grado de cobertura buena. Le siguieron la asociación de Ray grass italiano e inglés, trébol blanco y rojo más Dactylis, con un rendimiento de 24 TM/ha de forraje verde y una cobertura de regular a buena.

Al tomar muestras de plantas para cada especie o asociación de especies se encontró que, a pesar de que los pastos no tuvieron contacto de su sistema radicular con el relave, se produjo una evidente absorción de metales, en especial de zinc, cadmio, plomo y hierro. En *Calamagrostis vicunarium* el contenido de zinc después del experimento aumenta más de seis veces (332 ppm) y el contenido de plomo (32,9 ppm), cadmio (2,5 ppm) y hierro (3 160 ppm) es casi tres veces el valor arrojado por un análisis inicial. En esta especie todos los elementos se encuentran en concentraciones aparentemente tóxicas.

En *Festuca dolychophylla* más importante fue el contenido de plomo (110 ppm), lo cual es más del doble del contenido observado en otros pastos cultivados (en promedio 38,08 ppm), ello revela una mayor capacidad de acumular este metal por parte de esta especie los resultados obtenidos en un principio, el de zinc es diez, cobre siete veces y cadmio seis veces. Estos resultados demuestran que en términos generales la *Festuca* absorbe en gran cantidad los cationes tóxicos presentes en el suelo.

En forma general los resultados obtenidos al final de la revegetación en la cancha de relaves de Quiulacocha indican que a pesar de que los suelos donde se sembró los pastos no contenían concentraciones tóxicas de metales, el proceso de acumulación en la planta es un hecho concreto. La presencia de estos metales se deba

probablemente a la acción de los vientos que depositan material particulado contaminado con estos metales en el suelo, los cuales ingresarían a la planta por vía radicular,

El análisis foliar revela además que el mayor contenido de metales se da en *Festuca dolychophila*, mientras en menor grado en trébol blanco en la asociación 1 (Ray grass – trébol blanco/trébol rojo). En general la acumulación se da en las raíces. Existe la posibilidad de que *Festuca dolychophyla* acumule alta cantidad de metales en sus raíces, pero los transloque sólo en pequeñas proporción hacia las hojas y tallos, los cuales al servir luego de alimento a los animales, no produciría problemas de toxicidad. Es necesario realizar mayores investigaciones sobre el particular.

6.7.4 Caso D: Experiencias de Revegetación en Minera Yanacocha

Ubicación: La Empresa Minera Yanacocha tiene sus operaciones ubicadas entre los 3500 a 4200 msnm, instalaciones se extienden en la región Jalca o Puna en el departamento de Cajamarca en el Norte del Perú.

Clima: Templado frío

Actividad: Gran Minería – explotación de oro a tajo abierto

En 1998, ADEFOR y Minera Yanacocha, formularon el proyecto de revegetación en el marco del Programa “Ambiente, participación y Gestión Privada” en el que uno de los objetivos era generar tecnologías de revegetación con especies nativas altoandinas, para restaurar áreas disturbadas por la actividad minera. Además, la empresa ha realizado actividades de fortalecimiento de capacidades humanas, y los pobladores ahora conocen equipos mecánicos apropiados para la revegetación. Se seleccionaron solo terrenos permanentes para desarrollar las técnicas para definir las especies de pastos mas adecuadas según el tipo de suelo y pendiente, así como los medios para incrementar la fertilidad de los suelos.

En Yanacocha se realiza el mejoramiento de las propiedades del suelo superficial o top soil de la siguiente manera: El mejoramiento de la fertilidad física utilizando drenes en suelos de lutitas, aplicando enmiendas orgánicas al inicio de la siembra (25 sacos de estiércol de gallina/Ha en suelos superficiales y 62 sacos/Ha en suelos minerales)

El mejoramiento de la fertilidad química se realiza con la finalidad de disminuir la acidez y aumentar el contenido de nutrientes para lo cual se aplica guano de islas, 10 sacos/Ha, en suelos superficiales y 6 sacos/Ha de guano de islas y 1 saco de superfosfato triple/Ha en suelos minerales, y también para favorecer la actividad microbiológica se aplica 1 TN cal / Ha. Para el abonamiento se recomienda la utilización de estiércol de vacuno, pero se pueden usar mezclas de 10 TN guano de islas y 30 TN de gallinaza/ Ha.

La Estrategia de revegetación de coberturas de relaves y desmontes consiste en la iniciativa de restauración de tierras lo cual consiste en etapas de reconformación del terreno y luego de revegetación. La reconformación del terreno consiste en realizar las siguientes actividades: Perfilado y conformación de terreno, transporte y colocación de suelo orgánico en los terrenos o áreas restauradas e implementación de estructuras para control de erosión y drenajes en la zona. Luego se procede a la revegetación o siembra de pastos.

Revegetación de Coberturas

La Restauración puede ser temporal y se realiza únicamente con especies introducidas de rápido crecimiento, durante la vida operativa de la mina y su función principal es el control de sedimentos, consiste en la colocación de una cobertura natural (suelo orgánico) sobre el suelo que podría erosionarse.; o se puede realizar la restauración final o definitiva la cual se realiza con especies nativas e introducidas utilizan ambos tipos de especies debido a que las especies no nativas pueden generar rápidamente una cobertura vegetal que dará un microclima adecuado para el desarrollo de las especies nativas, además de ello este tipo de revegetación considera el transplante de ichu y la instalación de plántones de especies arbustivas de la zona y tiene por finalidad restaurar áreas utilizadas en las actividades mineras que no serán utilizadas nuevamente en la operación, dejando áreas en condiciones similares a las iniciales.

La revegetación es una fuente potencial de trabajo ya que brindan empleo a empresas especializadas de Cajamarca de la zona urbana y rural. De este modo, se convierten en una oportunidad de desarrollo local e impulso al empresariado cajamarquino. Por ejemplo, solo en el año 2004 se generaron 468 puestos de trabajo.

En los últimos cinco años La empresa Minera Yanacocha ha restaurado 1903 hectáreas entre restauraciones finales y temporales

Año	Hectáreas revegetadas
2001-2002	494
2002-2003	588
2003-2004	531
2004- 2005	290
Total	1903

Estos trabajos de restauración son una fuente importante de trabajo para personas de la zona y empresas que tiene maquinaria de alquiler

La siembra de pastos ha sido manual al voleo en surcos, la distancia entre surcos fue de 1 metro esparciendo la semilla a chorro continuo en el suelo superficial o top soil con pendientes de 0 a 25%. También se ha utilizado el método de Hidrosiembra para taludes con una maquina que permite la mezcla de semillas, fertilizantes, enmiendas y para la paja. La paja permite pegar la mezcla a la pared del talud y proteger a la semilla aplicada, brindándole condiciones optimas para su germinación. La cantidad de semilla utilizada es mayor pero de menor tamaño para que puedan ser fácilmente cubiertas por el mulch y obtener un mayor numero de semillas por peso, asegurándose así una cobertura rápida del talud; en 1 hectárea se aplica el Hidromulch en 954.5 Kg, utilizando 7,000 galones de agua, urea: 3 quintales de urea y 2 quintales de Superfosfato triple /ha.

Especies

Las especies introducidas *Dactylis potomac* (55 Kg./ha) con un 67 % promedio de cobertura y Ray grass (densidad de siembra de 55 Kg./ha y 95 Kg de semilla/ha en taludes) presentaron los mayores porcentajes promedio de cobertura. En el caso de especies nativas la especie que tiene mayor porcentaje de cobertura fue *Poa annua*.

7 RESUMEN DE CASOS DOCUMENTADOS

Este capítulo presenta siete casos bien documentados de rehabilitación de minas con sistemas de cobertura. Para cada caso, se presenta una breve descripción de parámetros geográficos junto con información acerca del clima, naturaleza del mineral explotado, tipo de cobertura construida sobre los desechos mineros y una breve presentación del rendimiento de la cobertura.

7.1 Equity Silver

La mina Equity Silver está ubicada en la parte interior y central de Columbia Británica, aproximadamente a 575 km al norte-noroeste de Vancouver (ver Figura 7-1). Durante la operación de la mina, se extrajo cobre, plata y oro desde una formación de rocas volcánicas y sedimentarias menores interestratificadas (MEND 2004). Equity Silver está ubicada en la meseta alpina en un entorno húmedo a una altitud de 1 300 m. La precipitación anual promedio en Equity Silver es aproximadamente 650 mm con precipitaciones pluviales que ascienden a alrededor de 300 mm.

La mina Equity Silver era una mina a tajo abierto que operó desde 1980 hasta 1992. La pirita es el sulfuro más abundante en las zonas mineralizadas y en el desmonte. En promedio, el contenido de pirita estuvo entre 2 y 5% en volumen en el desmonte, y con valores mucho mayores en las áreas de sulfuro y brechas masivas (Wojdak y Sinclair 1984). A fines de 1981, la primera pila de desmonte produjo drenaje ácido de roca (ARD). La calidad de agua promedio de ARD (1990-1995) mostró un pH de 2,62, una acidez de 8 180 mg/l CaCO_3/t ; y las concentraciones de cobre, hierro y zinc fueron de 116 mg/l, 340 mg/l y 154 mg/l, respectivamente (Aziz y Ferguson 1997). Este ARD fue el problema ambiental principal durante la explotación de la mina, y se tomó en cuenta para el plan de cierre final.

El emplazamiento contiene tres pilas de desmonte (O'Kane et al. 1998) (Figura 7-2): Botadero principal (52 TM y 41 hectáreas), Botadero del Extremo Sur (18 TM y 31 ha), y Botadero Bessemer (10 TM y 29 hectáreas). Se realizaron diferentes investigaciones para determinar el mejor esquema de cierre para las pilas de desmonte. La opción de rehabilitación escogida consistió en la construcción de una capa de morrena compacta de 0,5 m colocada directamente sobre las tres pilas de desmonte. Una capa de morrena no compacta de 0,3 m de espesor se colocó sobre la capa compacta. Esta última capa se usa como protección contra la erosión, evaporación y como un medio de crecimiento para vegetación. Se estimó que esta cobertura de dos capas permitiría sólo 5% de precipitación (Aziz y Ferguson 1997). Debido a los efectos de barrera capilar entre el desmonte grueso (D_{80} oscila de 127 a 28 mm, y D_{10} oscila de 3,5 a 0,45 mm), la capa de morrena compacta también sirve de barrera que limita el oxígeno. Se construyeron zanjas en la cobertura para canalizar la escorrentía alrededor del sistema de recolección ARD y permitir la descarga al ambiente (Aziz y Ferguson 1997).

Se determinaron las principales características hidrogeotécnicas de la cobertura: distribución del tamaño del grano, densidad relativa de los granos, límites Atterberg, pruebas de compactación (Proctor Estándar), curvas de retención de agua, compresibilidad y conductividad hidráulica saturada. Estas propiedades se resumen en la Tabla 7-1.

Resumen de Casos Documentados

Figura 7-1 Ubicación geográfica de la mina Equity Silver (O’Kane et al. 1998)

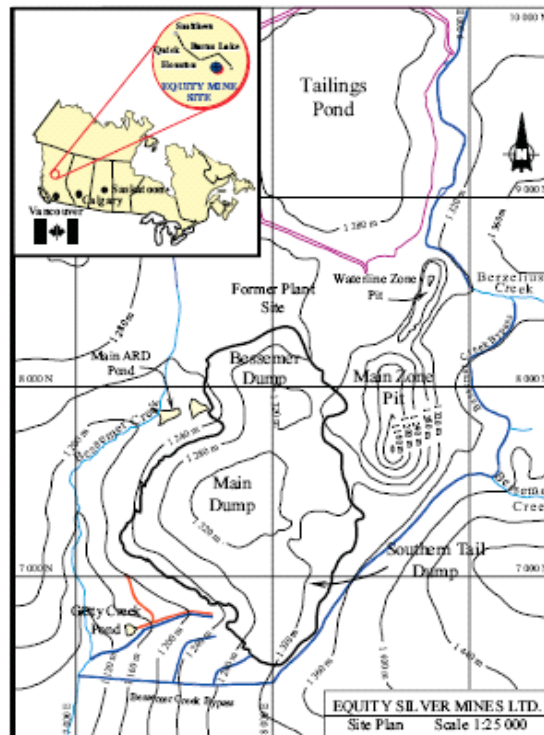
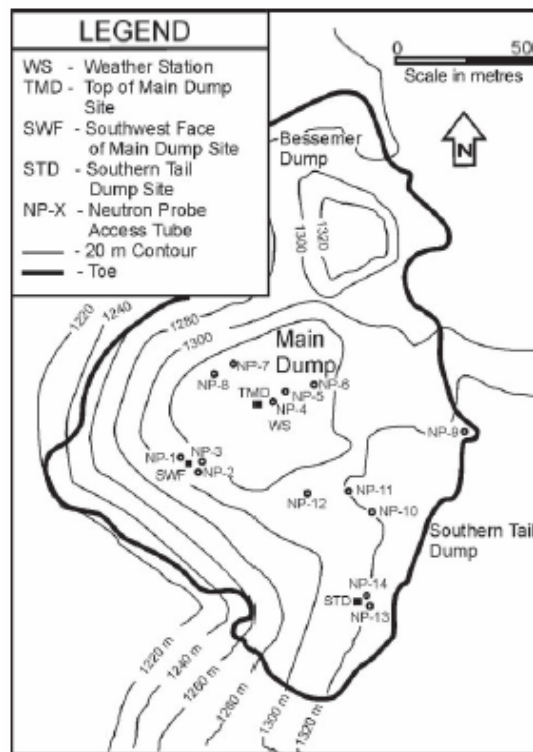


Figura 7-2 Plano de la mina Equity Silver: ubicación de botaderos y equipos de monitoreo (Weeks y Wilson 2005)



Resumen de Casos Documentados

Tabla 7-1 Propiedades principales de los materiales de morrena usados en la cobertura de Equity Silver (modificadas de Weeks y Wilson 2005)

Resumen de las propiedades de la morrena

Límite Plástico (%)	17
Límite Líquido (%)	40
Tamaño del Grano	
Canto rodado y grava (%)	23
Arena (%)	28
Limo (%)	40
Arcilla (%)	9

Resumen de las propiedades de la morrena, tal como ha colocada

Parámetro	Capa superior suelta	Capa inferior compacta
Grosor (m)	0,3	0,5
Conductividad hidráulica (cm/s)	1×10^{-5}	1×10^{-5}
Valor de entrada de entrada de aire	10	200
Porosidad (%)	38	33
Contenido de agua saturada (%)	22	18

La morrena compacta tiene un valor k_{sat} bajo estimado en 5×10^{-10} m/s, mientras que el mismo material no compacto tiene un valor k_{sat} que oscila entre 1×10^{-8} y 5×10^{-8} m/s. Se determinó que la densidad seca máxima fue $1,9 \text{ Mg/m}^3$ y el contenido de agua óptimo w_{opt} fue 14,5%. El límite de líquido y el límite de plástico fueron 39,6 y 17,4%, respectivamente. Se determinaron los valores ψ_a para la morrena no compacta y para dos morrenas compactas, una compacta en el lado seco (2% menos que w_{opt}) de la prueba Proctor Estándar óptima y una en el lado húmedo (2% menos de w_{opt}). Los resultados mostraron que ψ_a se encuentra entre 5 y 10 kPa para la morrena no compacta, y osciló entre 10 y 100 kPa para la morrena compacta; los valores más altos se midieron para las muestras compactas en el lado húmedo de w_{opt} . No se ha realizado una caracterización detallada del desmonte. Se puede encontrar más detalles sobre la caracterización de los materiales en O'Kane et al. (1998).

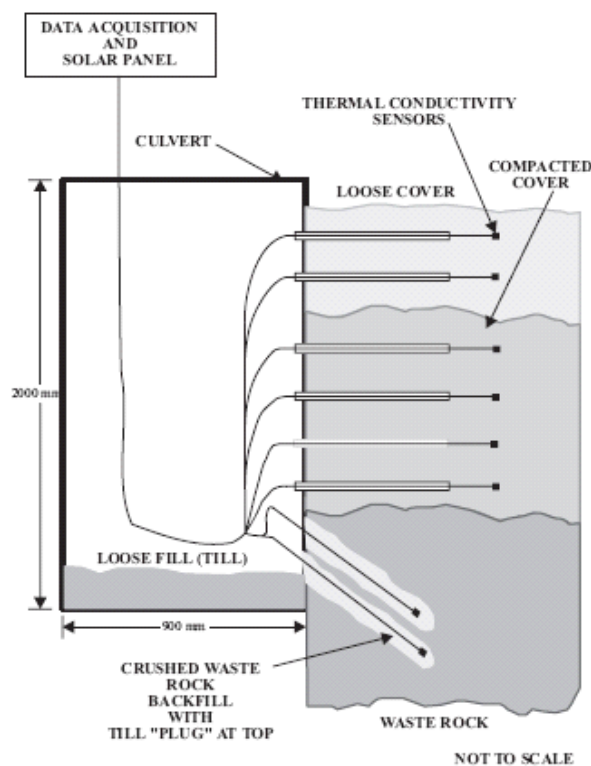
La construcción de las coberturas de morrena compacta-no compacta se inició en 1990 con la sección en declive del botadero de desmonte del extremo sur como una prueba de campo a gran escala; la cobertura completa se culminó en 1997. El costo promedio por hectárea fue \$35 000 (Aziz y Ferguson 1997). Este costo incluye una nueva formación de talud, desbroce, colocación, compactación y revegetación. La cobertura se ha sembrado con una mezcla de pastos y legumbres. La revegetación ha sido exitosa en los botaderos de desmonte con uso mínimo de fertilizante. Árboles y matorrales son retirados de las coberturas porque sus estructuras de raíces profundas podrían afectar la integridad de la cobertura.

Para evaluar el rendimiento de la cobertura de Equity Silver se ha instalado distintos equipos en distintos lugares en el Botadero Principal y en el Botadero del Extremo Sur. La Figura 7-2 presenta una vista desde arriba del emplazamiento con las distintas estaciones de monitoreo instaladas. Se ha instalado una estación meteorológica en la parte superior del Botadero Principal para medir la precipitación, velocidad del viento,

Resumen de Casos Documentados

temperatura, humedad relativa y radiación neta. El contenido volumétrico de agua se midió en el interior de 14 pozos de perforación con el método de sonda de neutrones. Se hicieron mediciones de la succión usando sensores de conductividad térmicos y tensiómetros (usados principalmente para validar las mediciones de succión con los sensores de conductividad térmicos). Los sensores de conductividad térmicos se concentraron en 3 estaciones monitoreo, cada una de las cuales tenía 6 sensores (ver Figura 7-3). También se ha instalado 14 lisímetros en la base de la cobertura para medir el índice de infiltración. También se midió la concentración de gas de dióxido carbono en algunas ubicaciones (ver Figura 7-2). Finalmente, desde que se construyó la cobertura se han realizado de manera esporádica mediciones de conductividad hidráulica saturada usando permeámetro Guelph.

Figura 7-3 Distribución de los Sensores de Conductividad Térmica



Nota: Distribución de los sensores de conductividad térmica en el sistema de cobertura de suelo en la mina Equity Silver (de O'Kane et al. 1998).

Después de 10 años de monitoreo de la cobertura, los resultados muestran que la morrena compacta por lo general mantiene un alto grado de saturación (S_r usualmente mayor que el criterio de diseño de 85%), lo cual limita la migración del oxígeno desde la atmósfera hasta el desmonte (ver Figuras 7-4 y 7-5). Las mediciones de succión por lo general están de acuerdo con valores de S_r , usualmente menores que ψ_a de la capa compacta (< 100 kPa), pero las mediciones de ψ algunas veces superan este valor por periodos de tiempo relativamente cortos (ver Figura 7-6). El monitoreo también muestra que la capa de morrena no compacta superior actúa como capa protectora contra evaporación. La capa se ve afectada por las variaciones estacionales en el contenido de humedad, con bajo contenido de agua durante los meses de verano y alto contenido de agua durante el otoño y la primavera (épocas de lluvia). En términos de limitación de percolación de agua, los lisímetros midieron un índice de percolación con un promedio de alrededor de 5% de precipitación.

Resumen de Casos Documentados

Figura 7-4 Perfil de humedad del suelo en NP4 de la mina Equity Silver (Weeks y Wilson 2005)

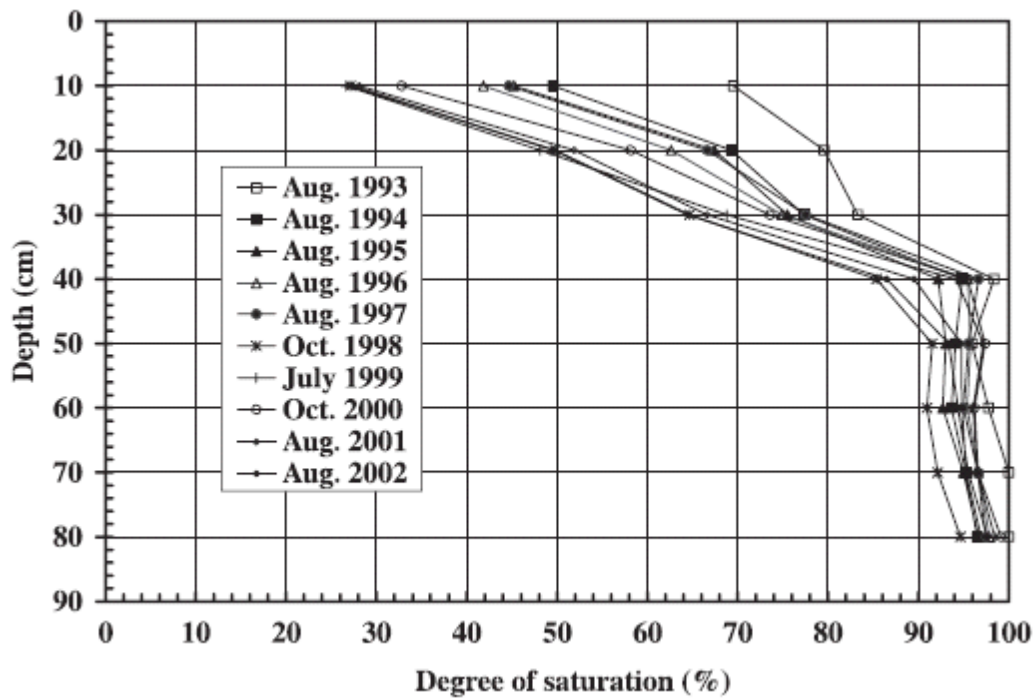


Figura 7-5 Perfil de Humedad del Suelo en NP7 de la Mina Equity Silver (Weeks y Wilson 2005)

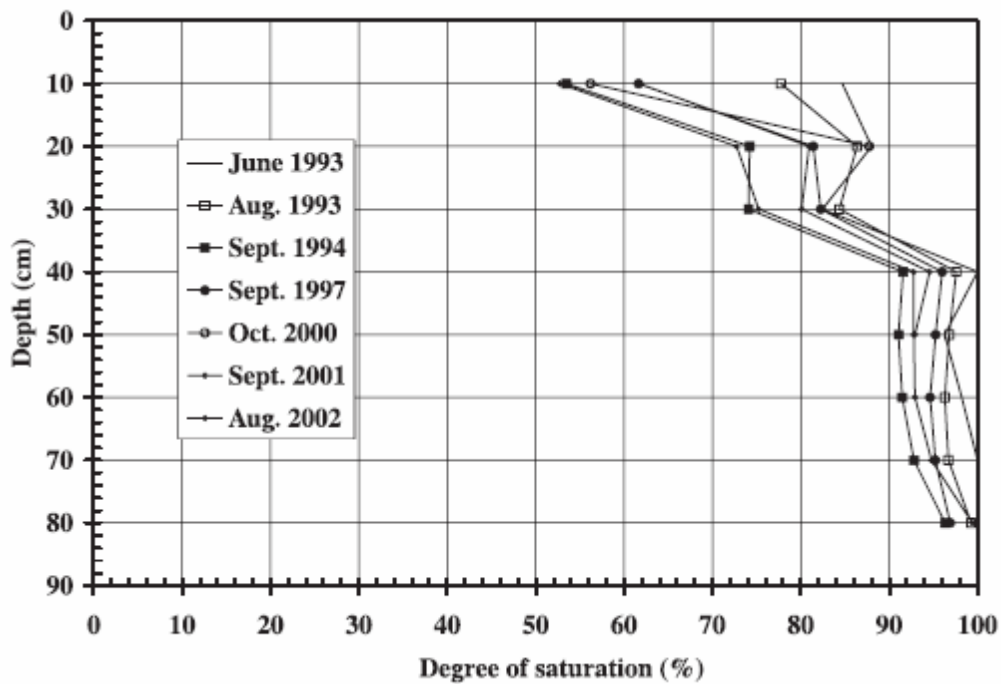
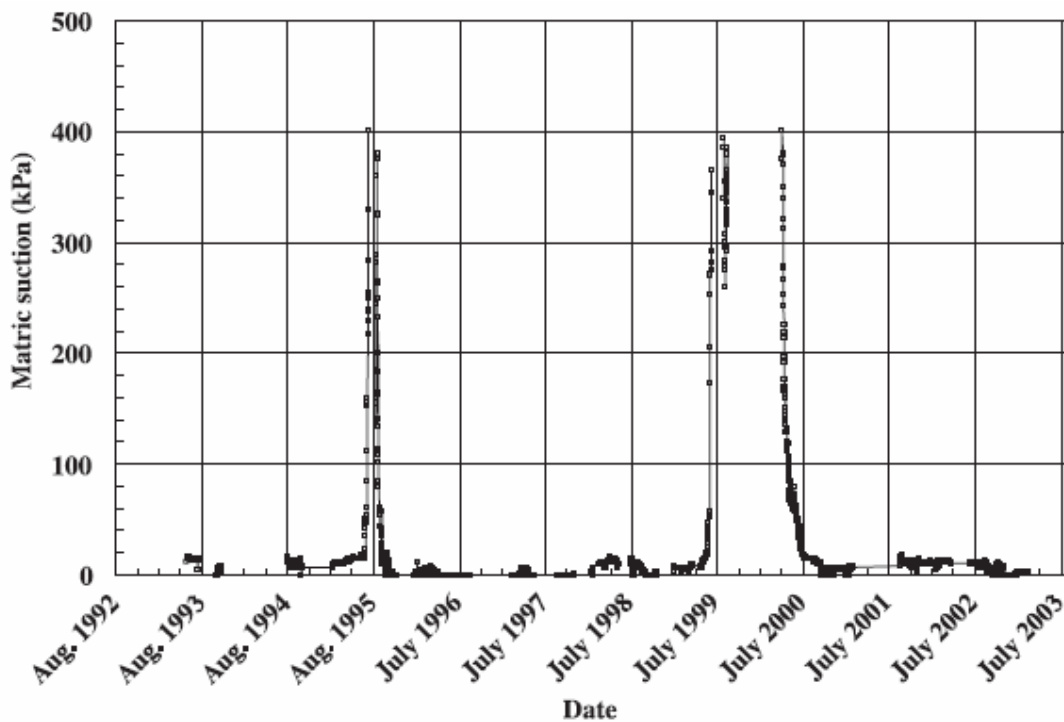


Figura 7-6 Succión del Suelo a 58 cm de Profundidad de la Mina Equity Silver



Succión del suelo a 58 cm de profundidad (ubicación estándar; de Weeks y Wilson 2005) de la mina Equity Silver.

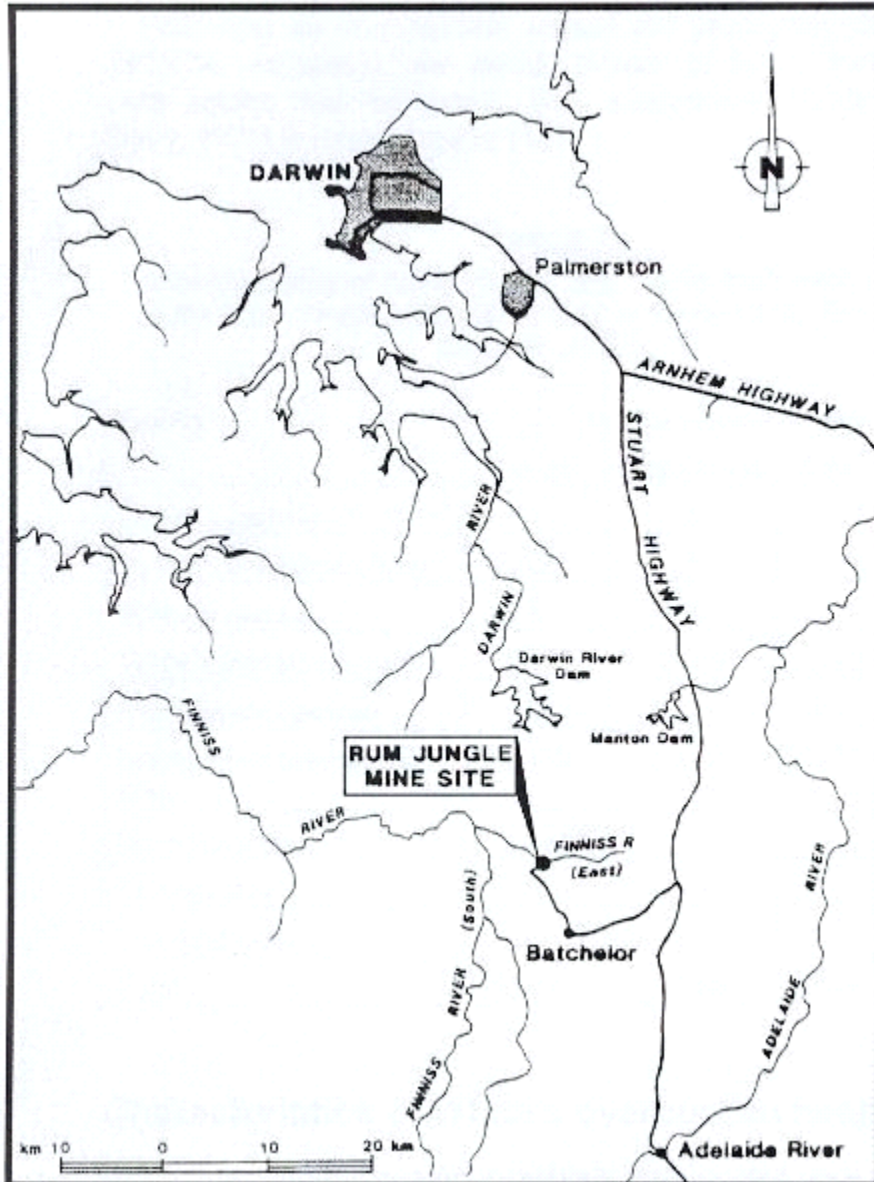
El balance de agua de la cobertura se comparó con valores predichos usando software SoilCover (Swanson et al. 2003). Estos resultados demostraron que después del procedimiento de calibración fue posible predecir el comportamiento hidráulico de la cobertura. De los 710 mm de precipitación, 285-350 mm constituyen evaporación real, alrededor de 20 mm (3% de la precipitación total) se percolará a través de la cobertura y alrededor de 180 mm se considera escorrentía. Como comentario final, es importante mencionar que el agua tratada en el efluente final corresponde a un índice de infiltración de agua a través de la cobertura mayor que los valores que se predicen y miden en los lisímetros. Se ha propuesto diferentes hipótesis para explicar dicho comportamiento: una conductividad hidráulica saturada mayor de la morrena no compacta y compacta debido a efectos climáticos y efectos geométricos, la cual afecta los diferentes componentes del balance de agua (Weeks y Wilson 2005).

7.2 Rum Jungle

La mina Rum Jungle está ubicada aproximadamente 85 km al sur de Darwin en el territorio del norte de Australia. La mina está ubicada en el ramal oriental del río Finnis, cerca del pueblo de Batchelor (ver Figura 7-7) y donde el relieve se considera un área plana. La región es caracterizada por un clima tropical/monzónico típico, con una época de estiaje y una época de lluvias. La precipitación pluvial media anual es alrededor de 1 600 mm, la cual cae principalmente durante el periodo comprendido entre octubre y mayo. Temperaturas máximas diarias altas se experimentan durante todo el año (promedio anual 34°C) así como altos índices de evaporación anual (>2 600 mm; Taylor et al. 2003a).

Resumen de Casos Documentados

Figura 7-7 Ubicación Geográfica de la Mina Rum Jungla (Taylor et al. 2003a)



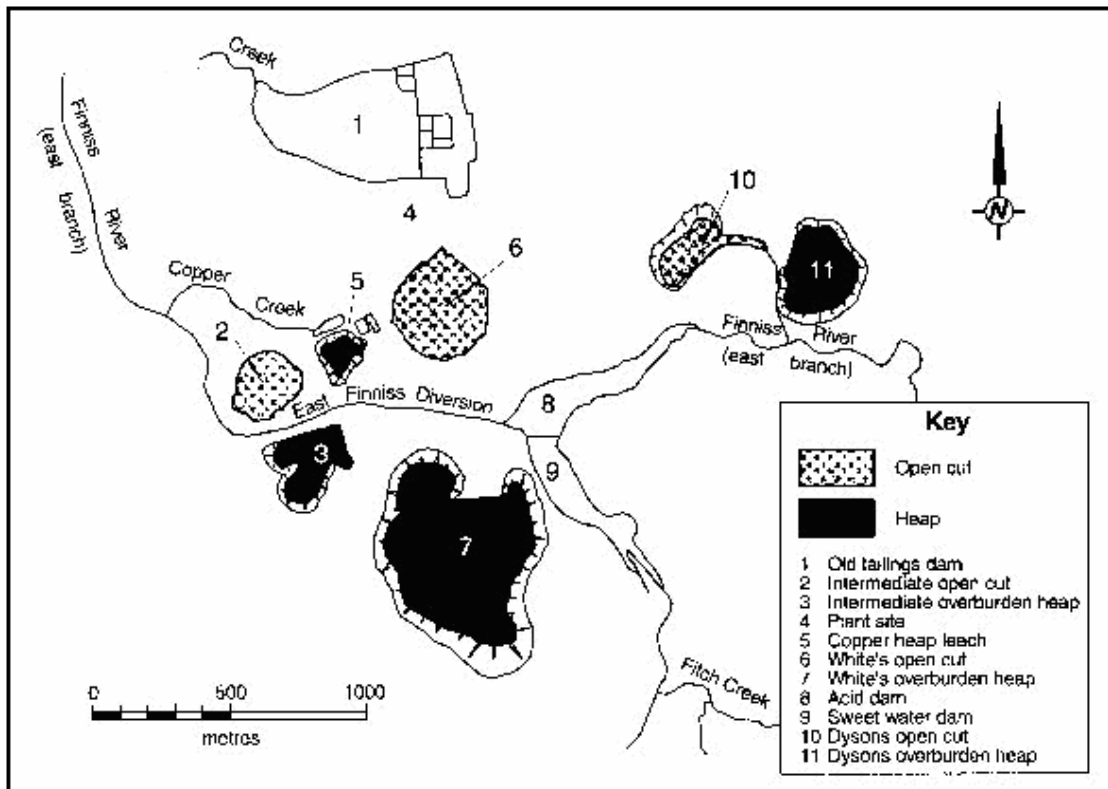
La mina operó entre 1950 y 1971, produciendo uranio, cobre, níquel y plomo (Ritchie y Bennett 2003). En un inicio se usaron métodos de explotación subterránea, pero la explotación a tajo abierto empezó en 1954. Cuando se abandonó la mina en 1971, había tres tajos abiertos rellenos con agua: White, Intermedio y Dayson, cada uno de ellos asociados con un botadero de desmonte cercano (Harries y Ritchie 1988). Las principales características de la mina en el momento del abandono se muestran en la Figura 7-8.

A mediados de la década de 1960, se observó la lixiviación ácida de pilas de material de desbroce. Se cuantificó el impacto de las fuentes principales de contaminación y el mecanismo que podrían ser responsables de la generación de esta contaminación (Davy 1975). Estas investigaciones identificaron que los botaderos de desmonte de White e Intermedio eran las principales fuentes de contaminación por metales pesados

Resumen de Casos Documentados

y ácido. Después de estas investigaciones, se realizaron estudios de caracterización del emplazamiento desde 1975 hasta 1983, como perfiles de temperatura (Harries y Ritchie 1981), propiedades térmicas (Blackford y Harries 1985), escorrentía (Harries y Ritchie 1983), densidad bruta y densidad del agua (Daniel et al. 1979), balance de agua y cargas de contaminación (Daniel et al. 1982) y gas poroso (Harries y Ritchie 1985). Luego se desarrolló un plan de rehabilitación en 1982 con la Confederación de Australia y el Gobierno del Territorio del Norte, en el cual se especificó el objetivo y las estrategias de rehabilitación (Ritchie y Bennett 2003). Los objetivos fueron la reducción de la contaminación del agua y de los peligros para la salud pública, y la mejora estética. La estrategia de rehabilitación era reducir la infiltración a menos de 5% de precipitación pluvial incidente y, de este modo, reducir el transporte de contaminantes desde las pilas (Taylor et al. 2003b), y también reducir el mantenimiento a largo plazo. Esta estrategia de rehabilitación consistió en (Allen 1986): 1) cubrir los botaderos de material de desbroce con un sistema de cobertura, a fin de reducir el ingreso de agua; 2) para recolectar relaves y cubrirlos para reducir la emanación de radón.

Figura 7-8 Mapa de la mina Rum Jungle (de Taylor et al. 2003a)



La rehabilitación consistió en diferentes fases: recontorneo de cada pila, construcción de sistema de drenaje y construcción de una cobertura (con vegetación) Sólo la fase de construcción de la cobertura se presenta en este documento, los detalles acerca de la otra fase se pueden encontrar en Taylor et al. (2003b).

El diseño de la cobertura se basó en diferentes criterios (Taylor et al. 2003b). La cobertura debe tener baja permeabilidad y evitar empozamiento, debe soportar una cobertura de vegetación, debe ser resistente a la erosión en el talud, el espesor de las capas debe ser el menor posible (para reducir costos), y la construcción debe ser simple y procurar el uso de materiales disponibles localmente.

Resumen de Casos Documentados

El sistema de cobertura resultante era una cobertura de tres capas. La configuración de la cobertura depende de su ubicación: parte superior y lado en declive:

- La parte superior de la cobertura consta de un mínimo de 22,5 cm de arcilla compacta como barrera infiltración recubierta con una capa de 25 cm de espesor de greda de arcilla arenosa (también compacta) que desempeña el papel de medio de crecimiento y evita la desecación de la capa de arcilla. Estas dos capas son recubiertas por arena de grava con un espesor mínimo de 15 cm usada como capa de protección contra la erosión y barrera contra la evaporación.
- En el talud lateral, la cobertura está compuesta de una capa de arcilla con un espesor mínimo de 30 cm, una capa de grava de arcilla arenosa de 30 cm de espesor y finalmente 15 cm de roca triturada.

Las propiedades de los materiales para cada una de estas capas se presentan en la Tabla 7-2 (Taylor et al. 2003b). Estos materiales se tomaron de cinco tajos, todos a una distancia máxima de 10 km de la mina Rum Jungle.

Tabla 7-2 Propiedades del material para cada capa del sistema de cobertura

Tipo de material	Arcilla laterítica	Greda de arcilla arenosa	arena de grava
Grosor máximo	150 mm	150 mm	--
Grosor máximo de capa	225 mm	250 m	150 mm
Compactación	≥ 98% de la densidad seca máxima	≥ 90% de la densidad seca máxima	Suelta
Densidad compacta	> 1,8 t/m ²	--	--
Contenido de humedad	≥ 97% y ≤ 101% del óptimo	≥ 98% y ≤ 102% del óptimo	--
Permeabilidad (después de la colocación y permeación)	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁹ m/s	--	> 10 ⁻⁷ m/s
Límite de líquido	≥ 40 y ≤ 65	≥ 30 y ≤ 60	≤ 40
Índice de plasticidad	≥ 15	≥ 10	≥ 15
Dimensión máxima de partículas	75 mm	150 mm	150 mm
Gradiente: Tamaño de tamiz (mm)	% que pasa		
150	100	100	100
75	100	90-100	90-100
19	90-100	85-100	65-95
2,36	75-100	45-80	25-60
0,425	50-90	30-60	18-40
0,075	35-80	20-45	10-30

Propiedades del material para cada capa del sistema de cobertura de tres zonas que se emplea en Rum Jungle (after Taylor et al. 2003a).

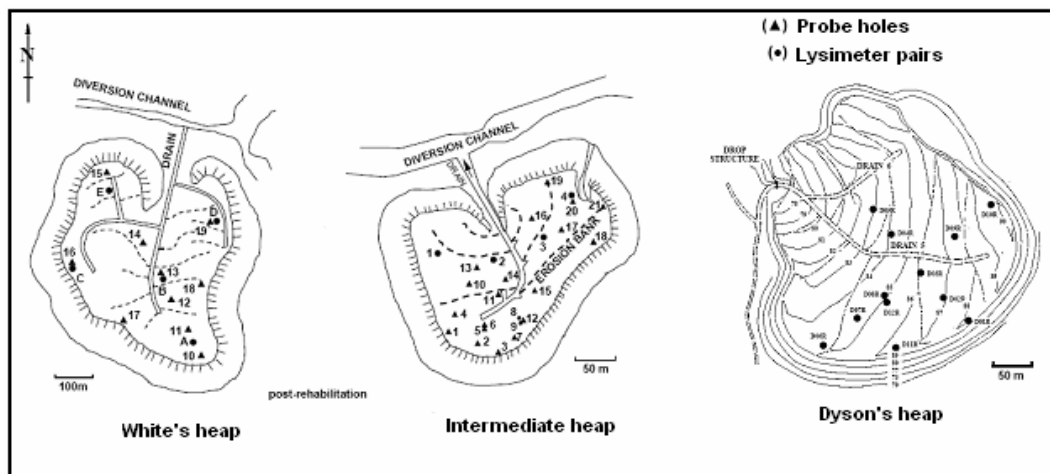
En el caso de la Pila de Material de Desbroce de White, en donde los materiales se dejaron expuestos entre 26 y 30 años, la cobertura se construyó entre setiembre de 1983 y julio de 1984, con revegetación entre noviembre de 1984 y abril de 1985. Los materiales de Desbroce Intermedios estuvieron expuestos durante alrededor de 20 años, y la cobertura se construyó entre setiembre de 1985 y mayo de 1986.

Resumen de Casos Documentados

Finalmente, la cobertura de la Pila de material de Desbroce de Dayso se construyó y vegetó entre junio de 1985 y 1986.

Para evaluar el rendimiento de la cobertura Rum Jungle, se instalaron distintos equipos de monitoreo; una descripción detallada de la instrumentación se puede encontrar en Timms y Bennett (2002). En resumen, se instalaron cinco lisímetros en la pila de White en 1983 para medir el índice de infiltración de agua a través de la cobertura. También se instalaron cuatro pares de lisímetros en la pila Intermedia luego de recontorneo. Además, se perforaron orificios para sonda en las tres pilas para la medición de la temperatura interna y las concentraciones de oxígeno de gas poroso; estos dos parámetros se usaron para evaluar los índices de oxidación de sulfuro. La ubicación de diferentes instrumentos se muestra en la Figura 7-9.

Figura 7-9 Ubicación de hoyo de sonda y pares de lisímetros en las pilas de White



Ubicación de hoyo de sonda y pares de lisímetros en las pilas de White, Intermedia y de Dyson en la mina Rum Jungle (modificada de Taylor et al. 2003b).

Los resultados del monitoreo se presentaron en diferentes informes como la evolución de la calidad del agua en el Ramal Este del río Finniss, índice de infiltración de agua usando lisímetros, e índices de oxidación. La calidad el agua se analizó en el Ranal Este del río Finniss y en una estación ubicada corriente abajo del emplazamiento (Lawton y Overall 2002). Los resultados principales se muestran en la Tabla 7-3. Para el índice de infiltración del agua, Kuo et al. (2003) ha tratado la efectividad del lisímetro instalado en Rum Jungle. El índice de infiltración anual en la pila de White se evaluó como un porcentaje de precipitación pluvial incidente. Los resultados principales se muestran en la Figura 7-10 para cada año durante todo el periodo de monitoreo (Kuo et al. 2003). Los resultados indican que el índice de infiltración en la pila de White se incrementó en los últimos 8 años de las mediciones. Un análisis estadístico de los datos mostró que el índice de infiltración ha superado la especificación de diseño de 5% de precipitación pluvial en años recientes (Kuo et al. 2003).

Los índices de oxidación para las pilas de White e Intermedia se estimaron a partir de perfiles de concentración de temperatura y oxígeno realizados por Timms y Bennett (2002). Además, los índices de generación de sulfato correspondientes se estimaron y presentaron en la Figura 7-11. La comparación del índice de operación general antes y después de la rehabilitación revela que la cobertura reduce la oxidación en los desechos mineros (Taylor et al. 2003b). No obstante, a pesar de esta reducción, se observa que la oxidación sigue ocurriendo y que el índice de generación de sulfato se

Resumen de Casos Documentados

incrementó durante los últimos años, indicando que el rendimiento de la cobertura se ha deteriorado con respecto a la limitación del flujo de oxígeno. Se debe observar que el flujo de oxígeno así como el de agua aún permanecen muy por debajo de sus niveles de previos a la rehabilitación en las pilas.

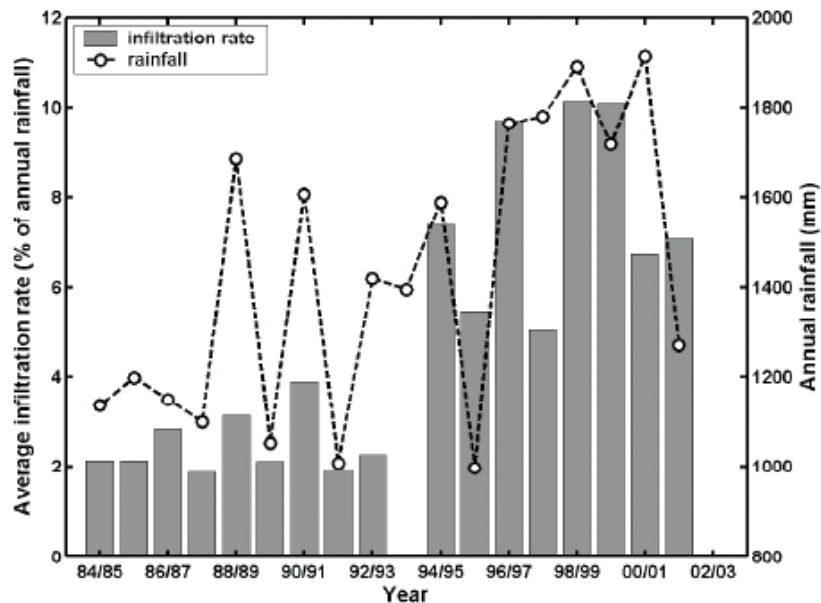
Tabla 7-3 Datos de carga históricos de contaminantes seleccionados

Year	Flow volume (m ³ × 10 ⁶)	Rainfall (mm)	Cu (total)	Cu (dissolved)	Zn (total)	Zn (dissolved)	Mn (total)	Mn (dissolved)	Sulfate
1969/70	7	896		44		n/a		46	3 300
1970/71	33	1611		77		24		110	12 000
1971/72	31	1542		77		24		84	6 600
1972/73	22	1545		67		22		77	5 500
1973/74	69	2000		106		30		87	13 000
1982/83	9.5	1121		23		5		6	1 520
1983/84	48	1704		28		9		21	3 600
1984/85	11.7	1136		9.1		4.1		7.2	1 600
1985/86	11.4	1185		3.7		2.7		8.2	4 400
1986/87	13.2	1222		5.6		2.7		8.6	2 870
1987/88	6.3	1064		3.2		2		5.4	1 230
1988/89	35	1600		5.4		4.4		19.2	3 940
1989/90	3.1	900		1.8		1.6		3.9	760
1990/91	40.5	1590	14.9	3	7.4	6	30.5	24.1	4 000
1991/92	7.1	1002	3.8	2.8	2.7	2.6	9.1	8.9	1 260
1992/93	29.9	1421	11.9	5	3.9	3.9	24.7	21.8	2 696
1993/94	26.1	1367	12.7	4.6	5.3	4.4	17.9	16.9	2 281
1994/95	33.3	1580	10.6	4.5	5.8	5.0	18.9	17.6	2 994
1995/96	9.0	996	2.9	1.7	3.0	2.5	8.7	8.1	1 352
1996/97	77.9	1716	11.0	5.5	7.4	6.1	25.4	20.1	4 357
1997/98	47.3	1688	12.4	4.3	6.8	5.8	28.4	24.9	4 812
1998/99	53.2	1888	8.2	1.4	5.5	3.8	13.9	9.3	3 682
1999/00	45.1	1712	8.9	1.0	4.5	0.8	15.0	6.2	3 010
2000/01	64.6	1911	12.3	1.9	6.3	3.4	20.1	5.3	3 925

Datos de carga históricos de contaminantes seleccionados del emplazamiento de rehabilitación Rum Jungle conforme se midió en la estación de medición GS 8150097 (de Lawton y Overall 2002).

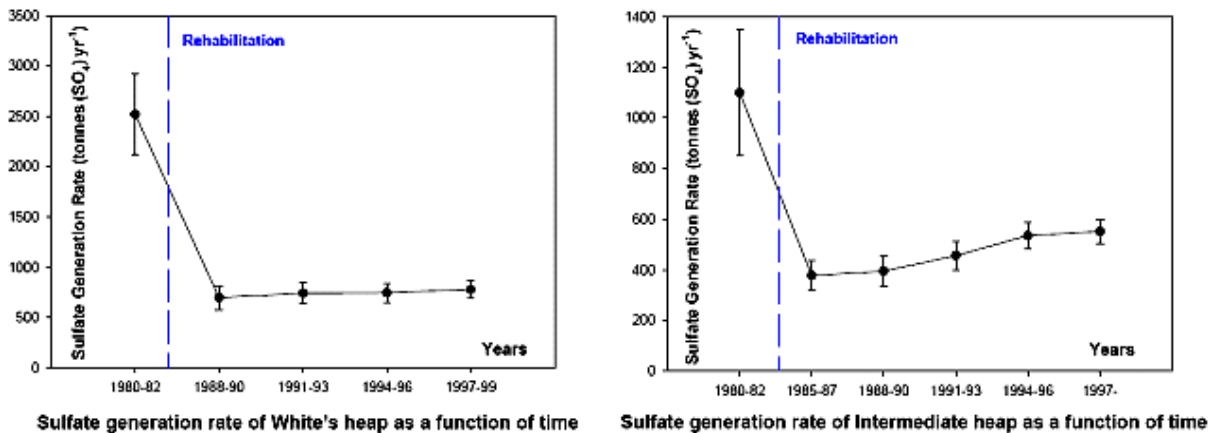
Resumen de Casos Documentados

Figura 7-10 Lluvias anuales e índice de infiltración



Lluvias anuales e índice de infiltración mejor estimado (de diez lisímetros) para cada año como porcentaje de lluvias anuales que ocurren en la pila de White en la mina Rum Jungle (de Kuo et al. 2003).

Figura 7-11 Índice de generación de sulfato



Índice de generación de sulfato de las pilas de White e Intermedia en función del tiempo en la mina Rum Jungle (modificada de Taylor et al. 2003b).

Finalmente, el deterioro de la cobertura de Rum Jungle fue analizado por Taylor et al. (2003b). Estos autores concluyeron que los materiales de cobertura ya no cumplen con las especificaciones originales. En particular, se encontró que la permeabilidad era mayor que la especificada, hasta en varios órdenes de magnitud. Este incremento de la permeabilidad es responsable de la mayor infiltración de precipitaciones pluviales observada en años recientes y el contenido de humedad del desmonte observado. Las mediciones de oxígeno mostraron que la cobertura actualmente reduce el flujo de oxígeno a 20-23% de éste en desechos descubiertos, y esta reducción parece ser proporcional al espesor de la cobertura.

7.3 Mina Barrick Goldstrike

La Mina Barrick Goldstrike está ubicada en la parte norte y central de Nevada, dentro del desierto Great Basin. El clima en este lugar se caracteriza por inviernos fríos y veranos secos con una temperatura anual promedio de 9,0°C. La precipitación anual promedio es alrededor de 260 mm y el potencial de evapotranspiración es aproximadamente 1 270 mm.

La mina Barrick Goldstrike es una operación minera de oro a tajo abierto y subterránea grande. La mina consta del Tajo Betze Post, la Bazza WRT, la Plataforma de Lixiviación AA, la Instalación de Relaves de Bloque del Norte, las Minas Subterráneas de Rodeo y Meikle, y unas Instalaciones de Horno de Tostación y Autoclave (ver Figura 7-12). La Plataforma de Lixiviación AA se ha cerrado y las Instalaciones de Desmonte de Bazza, que contendrá alrededor de 1,75 miles de millones de toneladas métricas de desmonte dentro de un área de 950 hectáreas, actualmente se está cerrando durante los próximos 12 años. La Plataforma de Lixiviación AA, que cubre una superficie de 170 hectáreas se rehabilitó en el 2000 y 2001.

Antes de la rehabilitación de la Plataforma de Lixiviación AA, se realizaron estudios de laboratorio y numéricos, y luego estudios de campo. Se construyeron dos celdas de pruebas de campo instrumentadas en la Plataforma de Lixiviación AA para evaluar el rendimiento de la cobertura bajo condiciones naturales y extremas (simulación de la precipitación extrema). Detalles de estas pruebas de campo y simulacro fueron presentados por Zhan et al. (2000, 2001). En el caso de la Plataforma de Lixiviación AA, la configuración escogida de la cobertura depende de la ubicación (Zhan et al. 2006):

- En los taludes del occidente y del norte, esta cobertura constó de 1,5 m de material de suelo superficial recuperado.
- En los taludes del este, esta cobertura se compone de 1,2 m de materiales no consolidados de la Formación Carlin en el tajo.

Los objetivos principales de estas coberturas de la Plataforma de Lixiviación AA son reducir el flujo de agua y usar los resultados del monitoreo para optimizar la futura cobertura de Bazza.

La cobertura se instrumentó en la parte oeste y este usando contenido volumétrico de agua (sondas TDR) y sensores (de disipación de calor) de potencial de presión de agua (Zhan et al. 2006). La transecta occidental (Estación W1 a W5) monitorea la cobertura de suelo superficial y la transecta oriental (Estación E1 a E4) monitorea la cobertura de Carlin (ver Figura 7-13). Cada estación de monitoreo está equipada con cuatro sensores de contenido y succión de agua. Estos sensores se colocan a una profundidad diferente (30 cm por debajo de la superficie del suelo, 40 cm por encima del contacto, 10 cm por encima del contacto y 10 cm por debajo del contacto entre la cobertura de la plataforma y el contacto de mineral de lixiviación; ver Figura 7-14). Además, se instaló un lisímetro gigante para la toma de muestras y el cálculo de la infiltración.

Figura 7-12 Mapa de la Mina Barrick Goldstrike (Zhan et al. 2006)



Los resultados de las mediciones del contenido y succión del agua durante el periodo comprendido entre los años 2001 y 2005 fueron presentados por Zhan et al. (2006). Estos resultados, presentados en las Figuras 7-15, 7-16, 7-17 y 7-18 (ver Figura 7-13 para las ubicaciones de medición), indican que el sistema de cobertura de suelo superficial fue más efectivo para interceptar y luego evaporar agua (Zhan et al. 2006). Los resultados del monitoreo del contenido de agua indican que entre 100 y 215 mm de agua infiltrada se pueden almacenar por estación en el sistema de cobertura y luego se pueden retirar por vegetación (Zhan et al. 2006). Los datos de la succión también muestran con claridad cómo los ciclos estacionales de infiltración de agua y la migración descendente en la primavera y un retiro posterior de ET, y la migración ascendente el resto de la temporada de cultivo (Zhan et al. 2006). Tanto en la cobertura de suelo superficial como Carlin, la gradiente hidráulica es descendente sólo durante un periodo corto de tiempo a fines del invierno e inicios de la primavera. La infiltración y el almacenamiento de agua en el material de mineral lixiviado probablemente se atribuye a propiedades hidráulicas de los materiales de cobertura (es variable y parece ser mayor que los valores de laboratorio), y los índices de precipitación durante los meses de invierno y primavera que se encuentran muy por encima del 62% promedio de la precipitación total (Zhan et al. 2006). Sin embargo, los datos de succión indican que el agua que llega al mineral lixiviado mayormente es retirada por la vegetación durante la temporada de cultivo.

El flujo de agua estimado por debajo de la base de la cobertura de suelo en cada ubicación se calculó usando las diferencias en la succión entre los sensores de la

Resumen de Casos Documentados

parte inferior en cada ubicación de monitoreo. Los resultados muestran que la percolación profunda neta tuvo un promedio de 0,2 a 2,0 mm al año. Este rango de flujo corresponde a una conductividad hidráulica de 2 a 7×10^{-8} cm/s. Asimismo, el índice de drenaje real de solución de lixiviación de la plataforma AA se atribuye al drenaje hacia debajo del mineral lixiviado con poca o nada de agua suplementaria debido al flujo del agua a través de la cobertura; estas observaciones fueron predichas con modelo numérico. En consecuencia, el sistema de cobertura de Plataforma de Lixiviación AA elimina la precolación profunda (Zhan et al. 2006).

En conclusión, se puede mencionar que el análisis de modelamiento numérico y las pruebas experimentales *in situ* realizadas en la Cancha de Lixiviación se usaron para diseñar el sistema de cobertura para las instalaciones de Bazza en la Mina de Oro Goldstrike. Se espera que esta cobertura propuesta reduzca la percolación profunda a través de la cobertura a menos de 5 mm/año.

Figura 7-13 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la mina Barrick Goldstrike (Zhan et al. 2006)

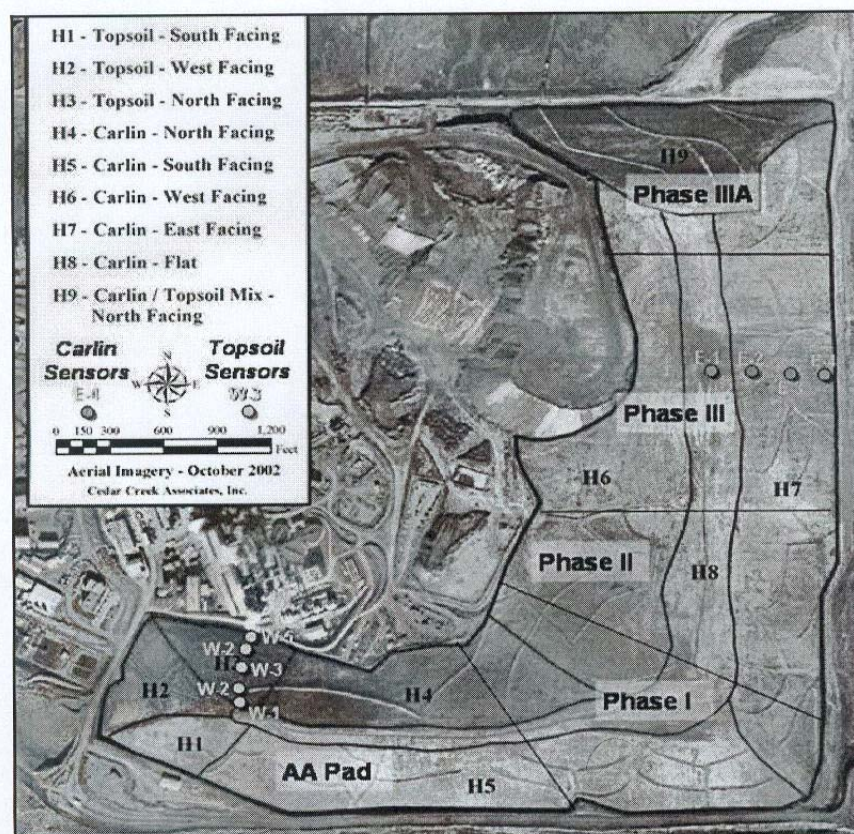
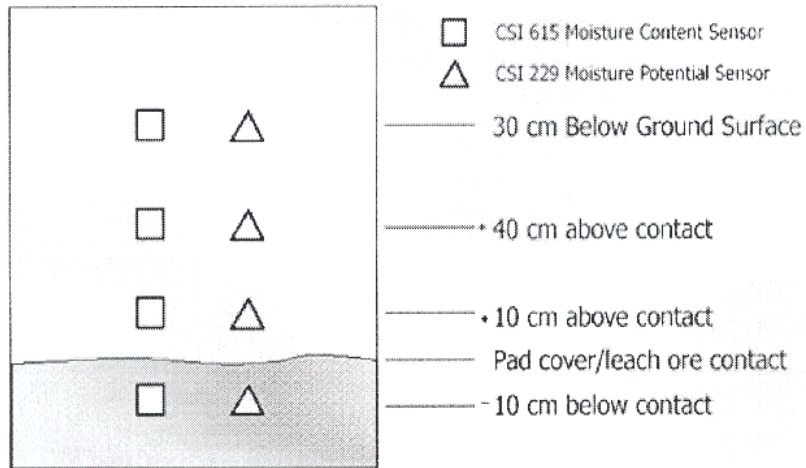
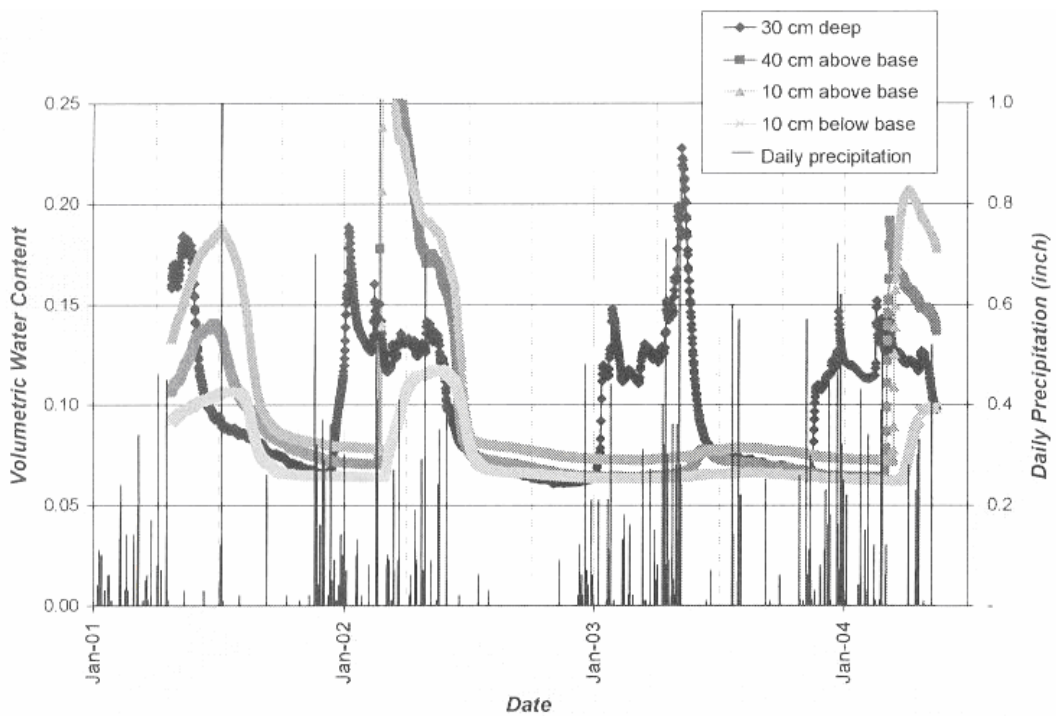


Figura 7-14 Profundidades de Instalación para Sensores de Monitoreo



Profundidades de instalación para sensores de monitoreo en la mina Barrick Goldstrike mine (de Zhan et al. 2006).

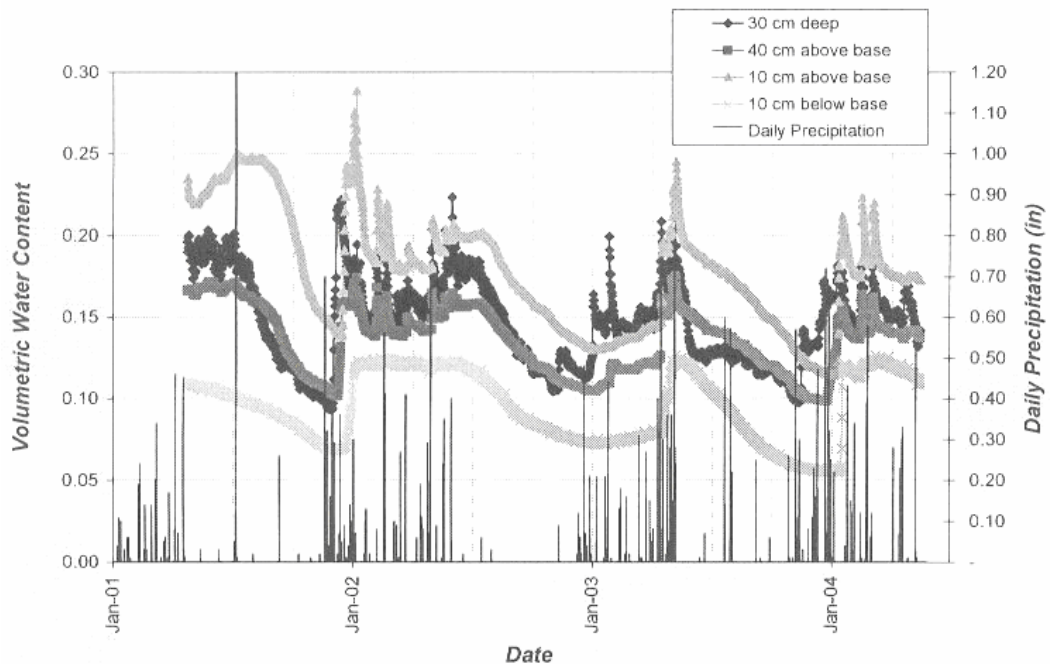
Figura 7-15 Contenido de humedad del suelo vs. tiempo de cobertura de suelo superficial



Contenido de humedad del suelo vs. tiempo de cobertura de suelo superficial en la mina Barrick Goldstrike (de Zhan et al. 2006).

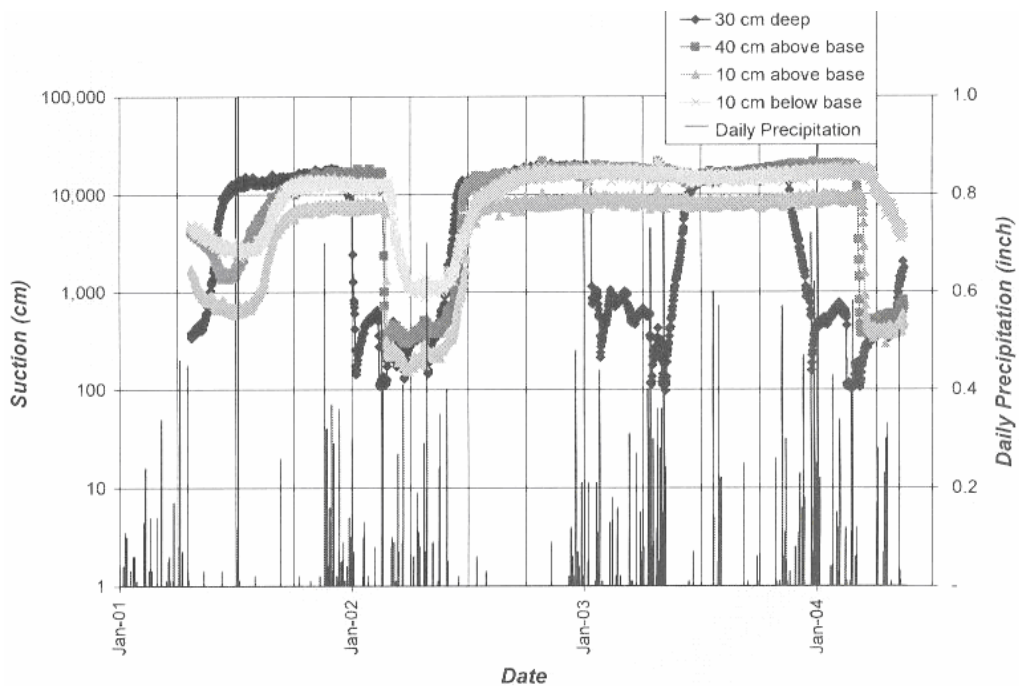
Resumen de Casos Documentados

Figura 7-16 Contenido de humedad del suelo vs. tiempo en la cobertura de Carlin



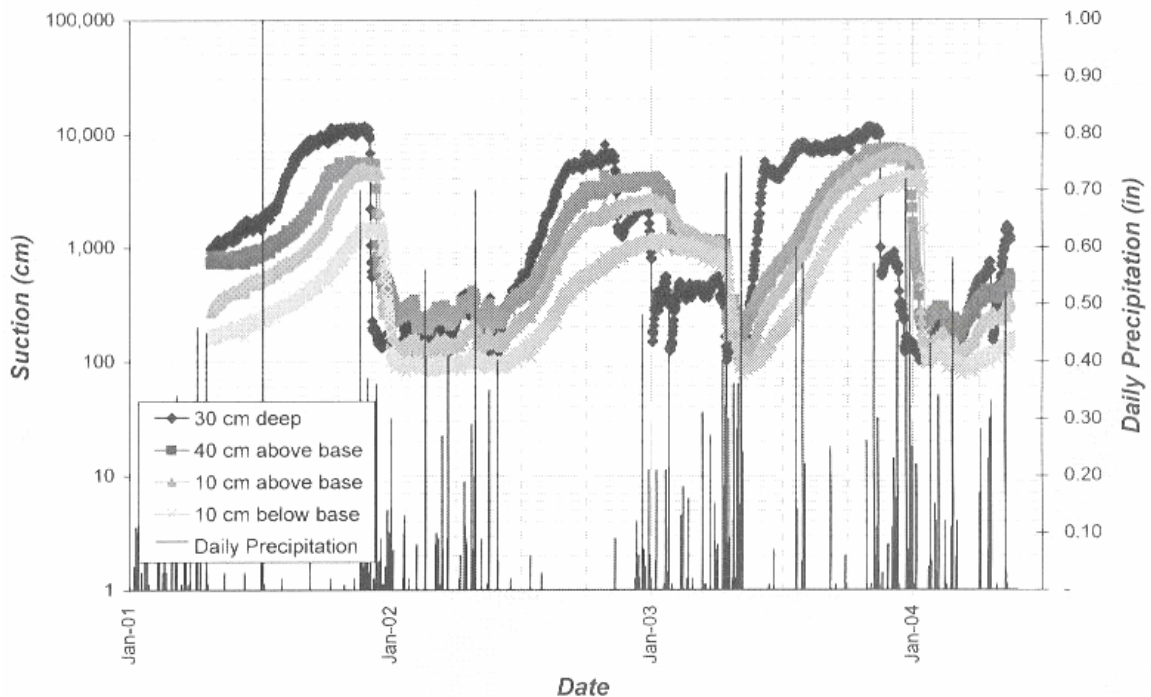
Contenido de humedad del suelo vs. tiempo en la cobertura de Carlin en la cobertura en la mina Barrick Goldstrike (de Zhan et al. 2006).

Figura 7-17 Variaciones de la succión cerca del talud medio superior en la cobertura de suelo superficial



Variaciones de la succión cerca del talud medio superior en la cobertura de suelo superficial al monitorear el sector Oeste 2 en la mina Barrick Goldstrike (de Zhan et al. 2006).

Figura 7-18 Variaciones de la succión cerca del talud medio inferior en Carlin



Variaciones de la succión cerca del talud medio inferior en Carlin sector Este 2 en la mina Barrick Goldstrike (de Zhan et al. 2006).

7.4 Les Terrains Aurifères (LTA)

El sitio de relaves LTA está ubicado en la región de Abitibi, en la provincia de Québec, Canadá (ver Figura 7-19). El clima de esta región se clasifica como continental moderado, y se caracteriza por estaciones contrastantes: los inviernos son fríos, la primavera y el otoño son relativamente húmedos con un índice de evaporación bajo, y el verano es relativamente caluroso y seco. La temperatura media anual es alrededor de 1,1°C, la precipitación pluvial es 914 mm, y el índice de evaporación anual se estima en 380 mm.

Durante los primeros años de la explotación del yacimiento aurífero de Malartic, la planta concentradora procesó un mineral no sulfuroso con mineralización de carbonato sustancial. Alrededor de 10 TM de relaves de esta operación se depositaron en una poza de relaves que cubría alrededor de 100 hectáreas. Después de un periodo de cierre prolongado, la planta concentradora se volvió a abrir en 1977 para procesar mineral de la propiedad de la Mina Bousquet cercana. Este mineral contenía una gran proporción de sulfuros; a diferencia del tipo anterior, los relaves de Bousquet eran generadores de ácido. Aproximadamente 8 TM de relaves de Bousquet se colocaron sobre los antiguos relaves del yacimiento aurífero, en la mayor parte de la región más occidental de la poza de relaves inicial. Esta cuenca occidental, denominada poza de relaves de LTA, cubre un área mayor de 60 hectáreas, y contiene alrededor de 12 m de relaves de sulfuro, recubriendo 5 m de relaves ricos en carbonato. La Figura 7-20 presenta una vista aérea de LTA antes de la construcción de la rehabilitación del emplazamiento.

Figura 7-19 Ubicación del emplazamiento de LTA (de Maqsoud et al. 2006)

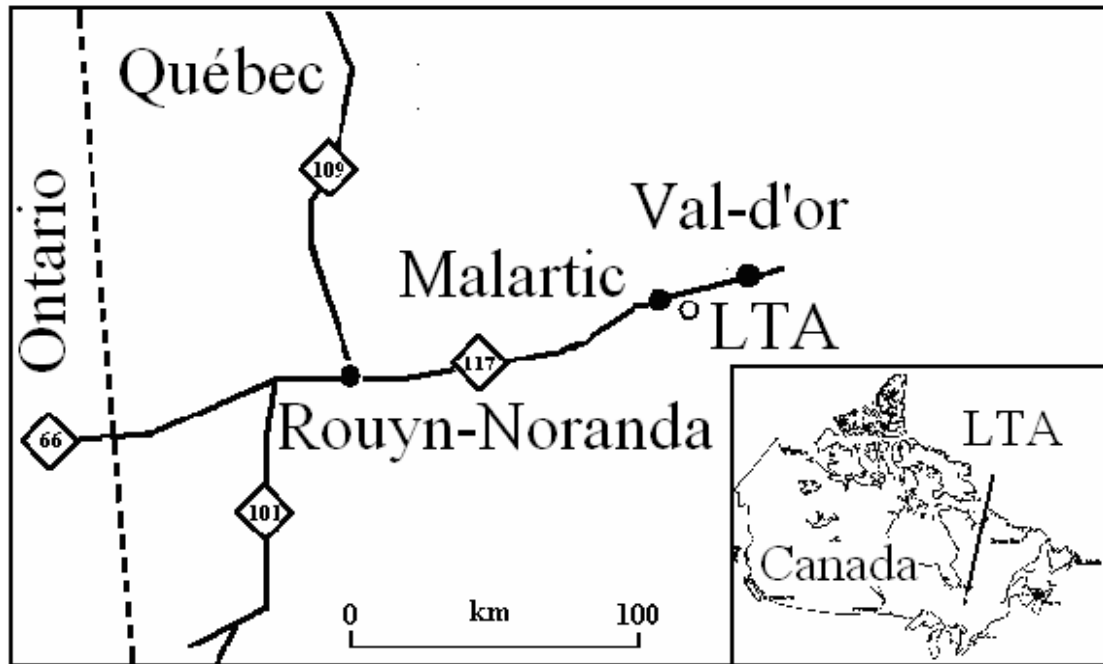


Figura 7-20 Foto Aérea del Emplazamiento de LTA

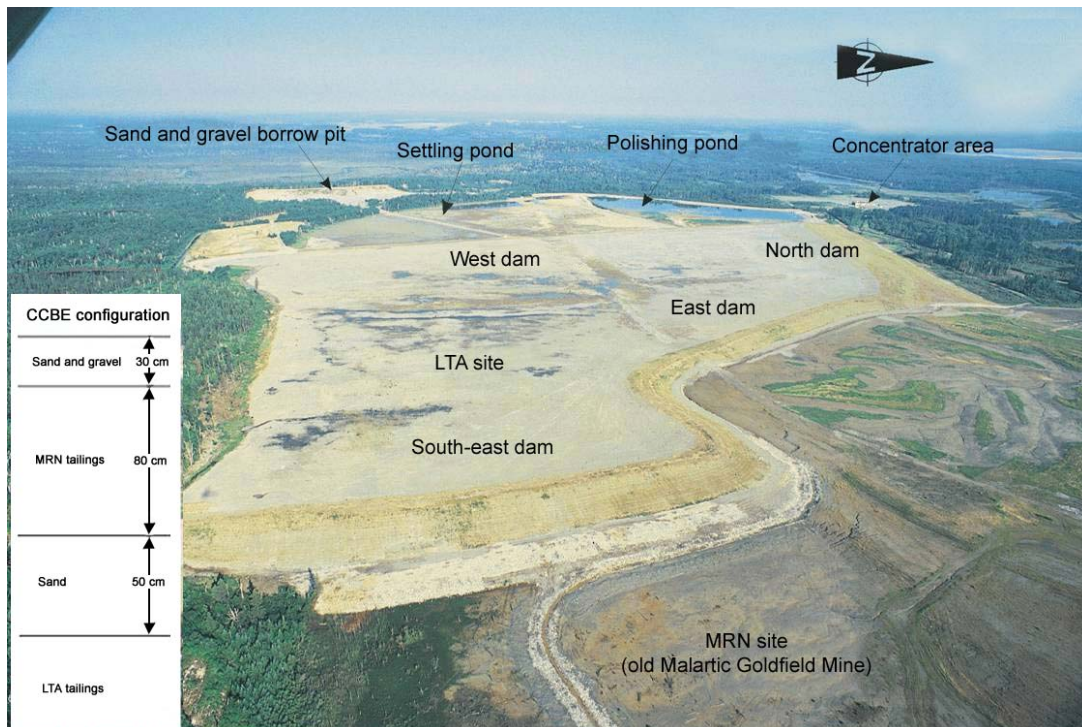


Foto aérea del emplazamiento de LTA antes de la construcción de la CEBC y la configuración de cobertura (de Bussi re et al. 2006).

Después del cierre permanente de la planta concentradora en el otoño de 1994, se investigaron varios escenarios de rehabilitación para LTA. Los resultados de estos estudios multidisciplinarios mostraron que la construcción de una cobertura con efectos de barrera capilar (CEBC) fue el modo más efectivo y económico de limitar la producción de drenaje minero ácido para este emplazamiento particular. El objetivo de la CEBC es mantener la capa que retiene la humedad a un grado de saturación (S_r) igual o mayor que alrededor de 85% para controlar la migración de oxígeno y la generación de drenaje minero ácido. El modelamiento geoquímico predijo que si este valor S_r (85%) se puede mantener en la cobertura, el efluente final tendría una concentración muy baja de Cu y Zn, y satisfaría los criterios ambientales de Québec y de Canadá (SENES 1995). Más detalles acerca de la evaluación de los escenarios de rehabilitación para LTA se pueden encontrar en McMullen et al. (1997).

El desafío en la fase de diseño de una CEBC es identificar los materiales y la configuración que satisfarán los objetivos ambientales para un costo óptimo. En esa perspectiva, numerosas pruebas de laboratorio y simulacros numéricos se realizaron antes de la construcción de la cobertura de LTA usando condiciones promedio y extremas (Golder Associates 1996; McMullen et al. 1997; Ricard et al. 1997, 1999). Esta investigación experimental y numérica indicó que el rendimiento ambiental objetivo podría conseguirse con una cobertura de tres capas. De este modo, el emplazamiento de LTA se rehabilitó durante 1995 y 1996, y como se muestra en la Figura 7-20, dicha cobertura está compuesta por (de la parte inferior a la superior):

- una capa de 0,5 m de arena usada como soporte y una capa de quiebre capilar;
- una capa que retiene humedad con un espesor de 0,8 m. Esta capa está compuesta de relaves no generadores de ácido (denominados MRN) tomados de la propiedad de yacimiento aurífero Malartic cercano (un lugar que pertenece al Ministerio de Recursos Naturales de Québec - MRN); y
- 0,3 m de arena y grava colocada en la parte superior que sirve de drenaje y capa protectora contra la evaporación, erosión y bio-intrusión.

Las propiedades de la capa superior de arena y grava son casi similares a las de la capa inferior de arena (Ricard et al., 1997). Los relaves de MRN tienen una distribución de tamaño de grano típica de roca dura (Aubertin et al., 1995, 1996, 1998) con un porcentaje pasante de 0,08 mm entre 65 y 90% y un D_{10} (diámetro de partículas pasante de 10%) de alrededor de 0,005 mm (ver Tabla 7-4). La arena tiene un porcentaje mucho menor de partículas finas (menos que alrededor de 5 % menor que 0,08 mm), con poco canto rodado (ninguna partícula con un diámetro menor que 15 μ m). Se estima que las conductividades hidráulicas saturadas (k_{sat}) de estos materiales son las siguientes: 5×10^{-5} cm/s para los relaves de MRN y $1,2 \times 10^{-1}$ cm/s para la arena, que se consideran típicas para dicho tamaño de grano (por ejemplo, Mbonimpa et al. 2002). La porosidad, n , de la capa que retiene humedad (relaves de MRN) medidos en el campo varió entre 0,36 y 0,50. El valor de entrada de aire ψ_a obtenido de las pruebas de succión es entre 200 y 275 cm de agua para relaves de MRN (alrededor de 20 a 27 kPa), dependiendo de la porosidad y el tamaño del grano (McMullen et al. 1997; Ricard et al. 1997). El ψ_a de arena medida en el laboratorio es entre 20 y 40 cm de agua (Ricard et al. 1997).

Resumen de Casos Documentados

Tabla 7-4 Propiedades principales de los materiales usados en la cobertura de LTA (de Bussi re et al. 2006)

	n	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	ψ _a (cm de agua)	k _{sat} (cm/s)
Relaves MRN	0,36 a 0,5	0,003 a 0,0075	0,037 a 0,085	0,030 a 0,065	200 a 275	5,0x10 ⁻⁵ (n = 0,44)
Arena	0,34 a 0,36	0,120 a 0,600	1 a 15	0,7 a 8	20 a 40	1,2x10 ⁻¹ (n = 0,35)

Los principales parámetros monitoreados usados para evaluar el rendimiento de la cobertura de LTA son el contenido volumétrico de agua (θ) y succión (ψ). Estos dos parámetros proporcionan conocimiento acerca de la respuesta hidráulica, el cual luego permite estimar el flujo de oxígeno a través de la CEBC (por ejemplo, Aubertin et al. 1999; Mbonimpa et al. 2003; Bussi re et al. 2003). Se usaron sondas TDR y sensores Watermark para monitorear el contenido volumétrico de agua *in situ* y la succión en varias capas de CEBC (por ejemplo, Ricard et al. 1999; Golder Associates 1996, 1999). La Figura 7-21 muestra la ubicación de las principales estaciones de monitoreo (se instalaron más de 50 estaciones) en el emplazamiento y también una sección de una estación de monitoreo típica. Cabe mencionar que también se han realizado pruebas del consumo de oxígeno y mediciones piezométricas para evaluar el rendimiento de la CEBC.

Los resultados principales del programa de monitoreo de nueve años del emplazamiento de LTA (Bussi re et al. 2003, 2006; Maqsood et al. 2006) muestran que los efectos de barrera capilar son bien desarrollados (cuando es necesario) entre diferentes capas de cobertura. Para el área plana y la parte inferior de las áreas de talud, θ en la capa que retiene humedad supera los criterios de diseño de 0,37 (para tener un coeficiente de difusión efectiva D_e menor que 10⁻⁸ m²/s) y las mediciones ψ se encuentran por debajo del valor de entrada de aire del material que retiene humedad (ver Figura 7-22). Pero en el caso de áreas inclinadas (que representan menos de 5% de la superficie de represamiento), se observa un efecto de talud, que tiende a desnaturalizar la capa que retiene humedad, en especial durante periodos secos prolongados (ver Figura 7-23). En estas zonas inclinadas, los criterios de diseño en términos de S_r se pueden exceder temporalmente cerca de la parte superior del talud. Sin embargo, en el caso del emplazamiento de LTA, no es necesario modificar la cobertura puesto que su rendimiento general logra los objetivos originales.

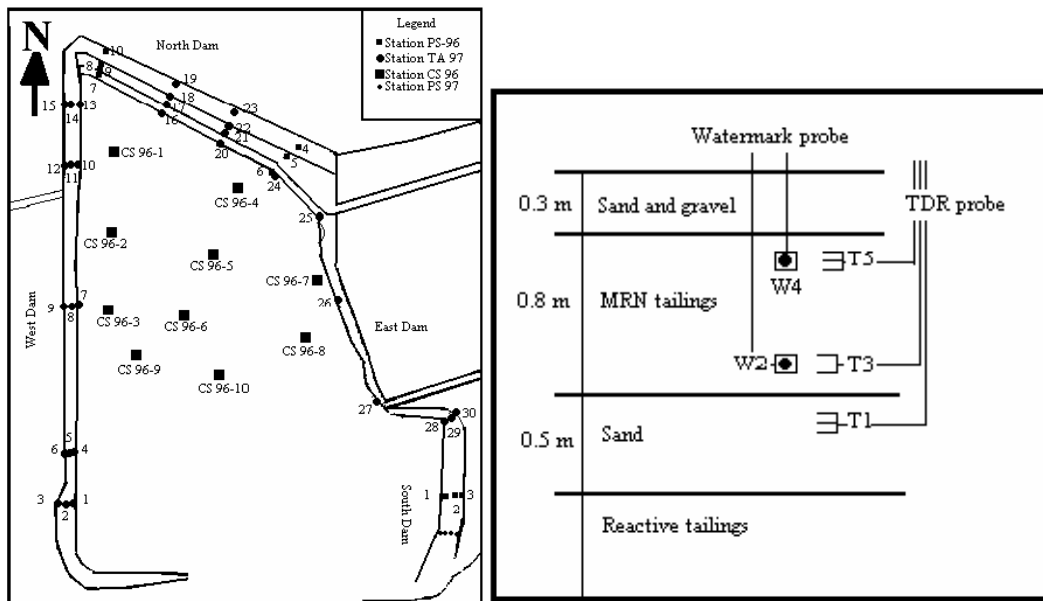
Asimismo, desde la construcción de la cobertura, la calidad del agua alrededor del emplazamiento no se ha visto afectada significativamente, y la compa a minera ha podido cumplir los criterios ambientales en el efluente final sin tratamiento químico del agua. También es importante mencionar que la vegetación se ha implementado en el talud para asegurar la estabilidad física. Sin embargo, se retiran árboles de la cobertura de manera periódica para evitar la penetración profunda de raíces que podría afectar la integridad de la cobertura.

Este caso de estudio muestra la importancia de analizar por separado, en la fase de diseño, las porciones planas e inclinadas de una CEBC (como se hizo para el diseño de cobertura de LTA). La inclinación influencia la distribución del agua en la CEBC, lo cual puede afectar su capacidad para limitar la migración de oxígeno. Ignorar este efecto podría conllevar presunciones erróneas y configuración de cobertura inadecuada. En la actualidad se está realizando más trabajo para evaluar el rendimiento de la cobertura de LTA integrando la influencia de relaves de MRN ligeramente reactivos, lo cual podría ejercer un impacto positivo en su capacidad para

Resumen de Casos Documentados

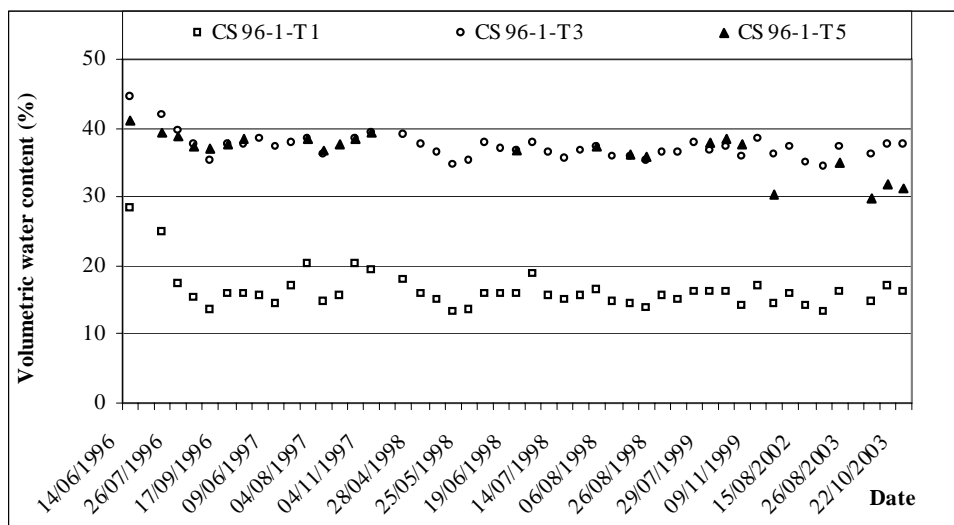
limitar la difusión de gas (Bussi re et al. 2002; Mbonimpa et al. 2003). También se est n realizando otros trabajos usando el emplazamiento de LTA como caso de referencia, como pruebas de consumo de oxígeno a largo plazo (Mbonimpa et al. 2002), pruebas *in situ* para evaluar el impacto de quiebre hidráulico para limitar la desaturación del talud (Bussi re et al. 2000; Maq oud et al. 2005), y el uso de modelos hidro-geoquímicos numéricos para predecir el rendimiento de la CEBC puesta en relaves reactivos (Molson et al. 2004).

Figura 7-21 Vista en Plano Esquemático del Emplazamiento LTA



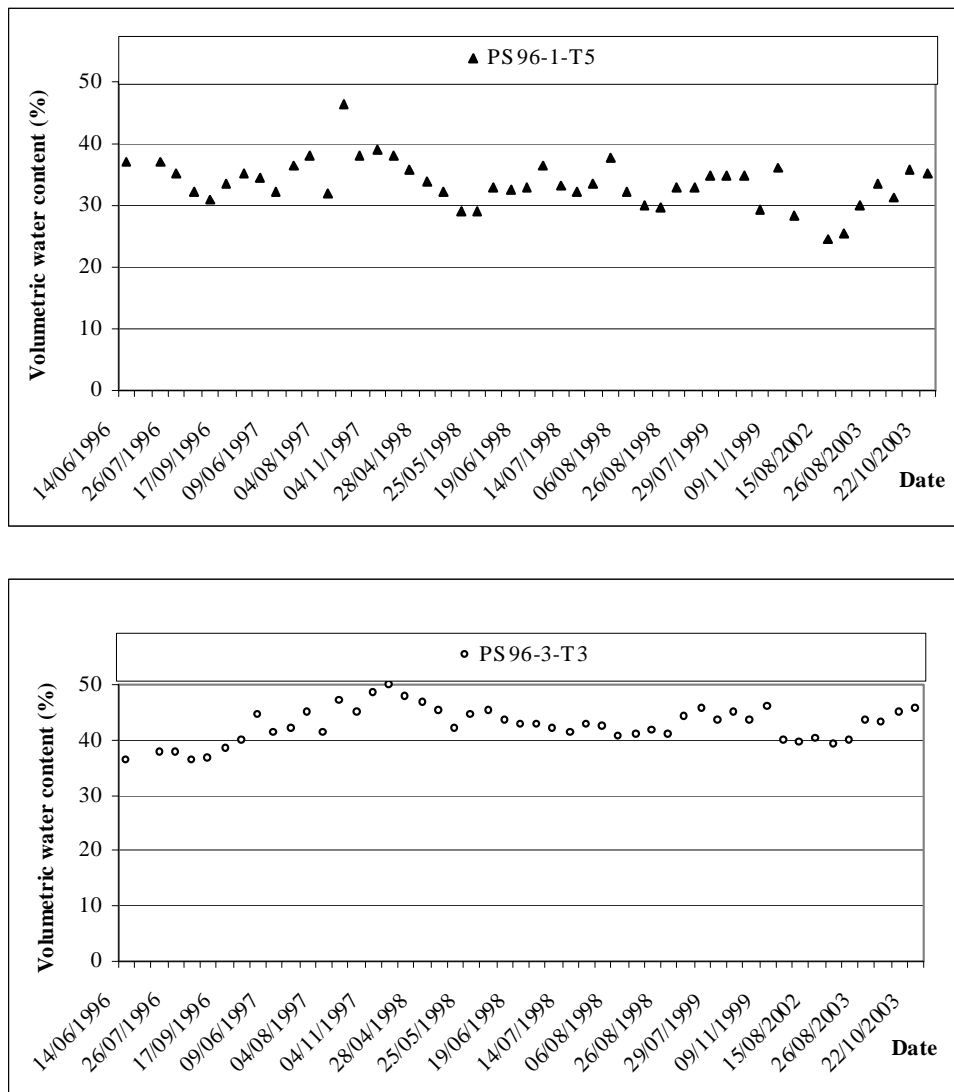
Vista en plano esquemático del emplazamiento LTA con las estaciones de monitoreo principales (izquierda) y una sección de una estación de monitoreo típica (derecha) (de Bussi re et al. 2006).

Figura 7-22 Evolución de Contenido Volumétrico de Agua



Evolución de contenido volumétrico de agua medido en la estación CS 96-1 (T1 colocado en la capa de quiebre capilar, T3 y T5 se encuentran en la capa que retiene humedad) del emplazamiento LTA (Bussi re et al. 2003).

Figura 7-23 Evolución del Contenido Volumétrico de Humedad



Evolución del contenido volumétrico de humedad cerca de la parte superior (figura de arriba) y cerca de la parte inferior (figura de abajo) del talud, medido en la capa que retiene humedad de la porción inclinada de la CEBC en el emplazamiento LTA (de Bussièrre et al. 2003).

7.5 Mina de Oro Kidston

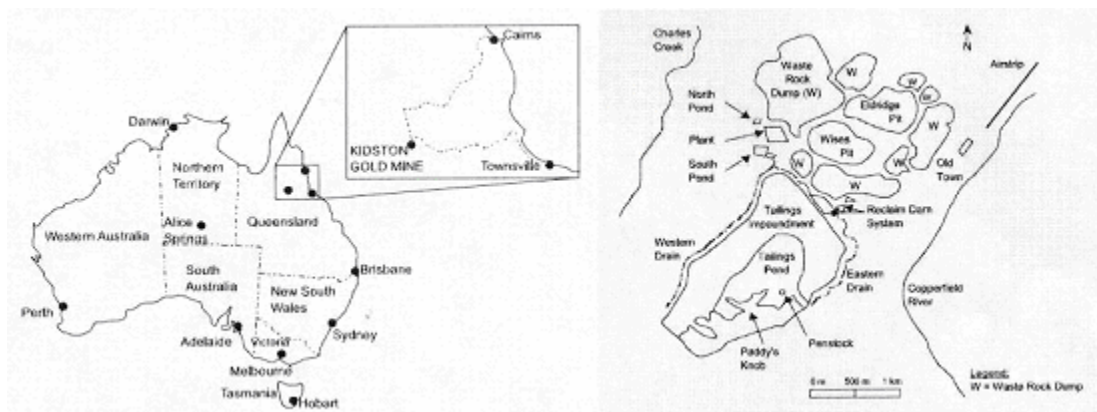
La mina de Oro Kidston está ubicada 260 km al sur-oeste de Cairns o aproximadamente 280 km tierra adentro de Townsville, Queensland, Australia (ver Figura 7-24). Esta mina operó entre 1985 y julio del 2001, y fue la mina de oro a cielo abierto más grande de Australia. El clima de esta área es tropical semi-árido con estaciones de lluvias y estiaje diferenciadas. La precipitación anual promedio es aproximadamente 700 mm con promedio de evaporación potencial de 1 650 mm (Rykaart et al. 2002).

Entre 1984 y 1997, se depositaron 68 millones de toneladas en una represa de relaves de 310 hectáreas. En general, los relaves tienen un potencial limitado para generar ácido, con relaves superficiales (parte superior 15 cm) que tienen una capacidad de generar ácido menor que los relaves más profundos debido al procesamiento de

Resumen de Casos Documentados

mineral de baja ley en las últimas fases de la vida de represamiento (Ritchie and Currey 2000).

Figura 7-24 Ubicación de la mina de oro Kidston (adaptada de Rykaart et al. 2003)



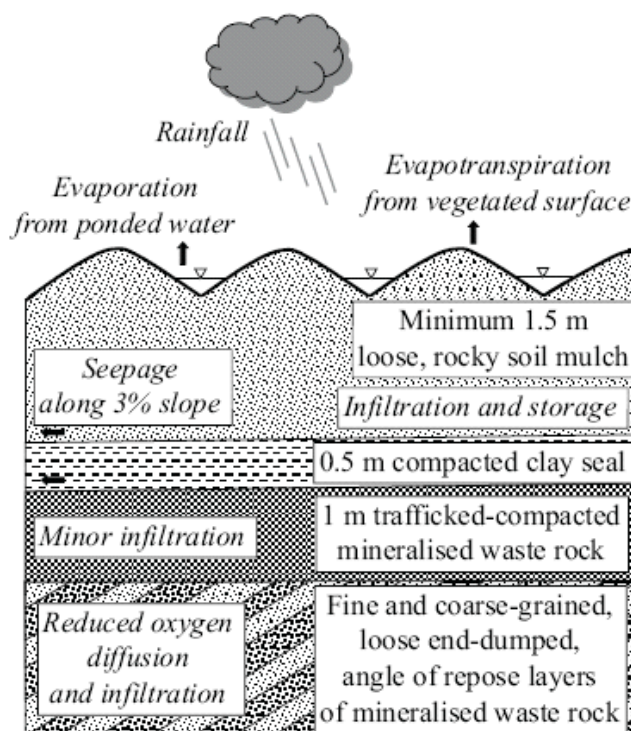
Después de octubre de 1997, la deposición convencional de relaves se cambió a relaves espesos depositados en uno de los tajos explotados, y se inició la rehabilitación de la represa de relaves (Rykaart et al. 2003). El desmonte mineralizado sub-económico, que comprende alrededor de 20 TM (alrededor de 10%) del desmonte en Mina de Oro Kidston, es potencialmente formador de ácido (Williams et al. 2003). El desmonte mineralizado tiene un contenido de oro en el rango de 0,55 a 0,7 g/t, un contenido de azufre total típico de 0,9%, una capacidad de neutralización de ácido (CNA) de 54 kg de CaCO_3 por tonelada de material, un potencial de producción de ácido neto (PPAN = $\text{APM} - \text{CNA}$, en donde APM = acidez potencial máxima) de -24 kg of CaCO_3 por tonelada de material ($\text{PPAN} \leq 0$ implica que la producción de ácido es poco probable), y una CNA/APM de 1,8 (una CNA/APM de entre 1 y 2 implica que la generación de ácido es posible, en particular en áreas de altas precipitaciones pluviales). El potencial de desmonte mineralizado para producir acidez se observó cuando el pH de la filtración que emanaba del Botadero Sur (desmonte mineralizado) disminuyó de pronto durante la época de lluvias extrema de 1990/91 de alrededor de 7,5 a 4,5, alrededor de cuatro años después de la construcción del botadero (Williams et al. 2003).

La planificación de la rehabilitación de la represa de relaves empezó a fines de 1989, y durante estas fases se llevaron a cabo diferentes coberturas de prueba de campo y modelamiento para diseñar un sistema de cobertura de infiltración neta cero para los botaderos de desmonte (Bews et al. 1997). Después de estos trabajos, se seleccionó un sistema de cobertura de almacenamiento y liberación de ensayo para botaderos de desmonte de Kidston. Esta cobertura se construyó en un área de 23 hectáreas del Botadero Sur a fines de 1995; y estaba compuesta por (ver Figura 7-25):

- Capa de desmonte de óxido arcilloso, que se humedeció y compactó para formar una capa de 0,5 m de espesor con una conductividad hidráulica objetivo de 10-8 m/s; la curva de tamaño de grano de esta capa contiene típicamente 10% de arcilla, 15% de limo, 35% de arena y 30% de grava.
- Desmonte de óxido rocoso, suelto y descargado en camión en montículos. La descarga suelta asegura una porosidad de alrededor de 0,25 que está disponible para el almacenamiento de infiltración de precipitación pluvial. El espesor mínimo es de alrededor de 1,5 m. La curva de tamaño de grano de esta capa contiene típicamente 2% del tamaño de limo, 26% del de la arena y 72% del de grava y mayor.

Resumen de Casos Documentados

Figura 7-25 Esquema de Sistemas de Cobertura de Botadero de Desmorte



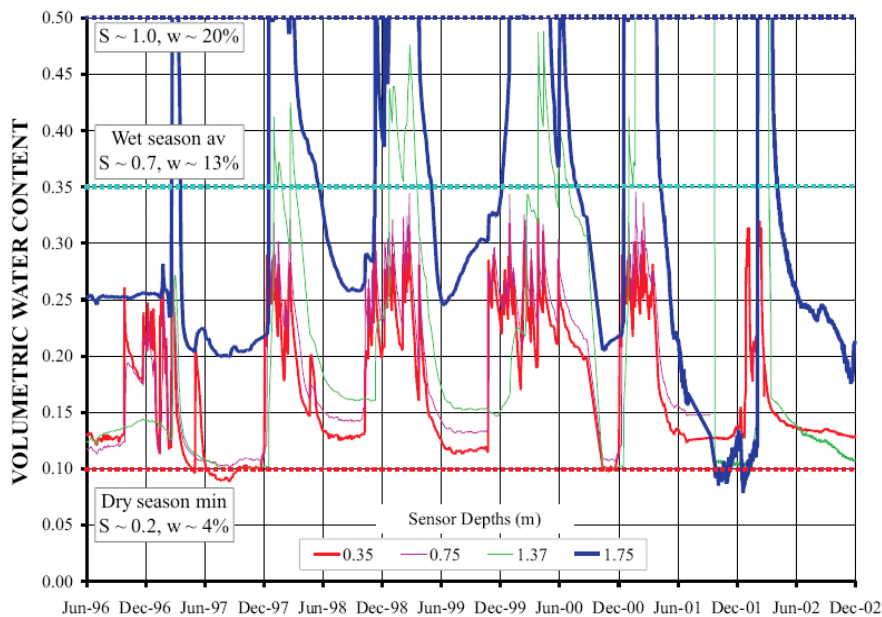
Esquema de sistemas de cobertura de botadero de desmorte de "almacenamiento y liberación" (de Williams et al. 2003).

Para evaluar el rendimiento de la cobertura, se instalaron estaciones de instrumentación totalmente automatizadas y una estación meteorológica totalmente automatizada (Kidston Gold Mine Ltd. 2000; Bews et al. 1997; Durham et al. 2000). Se usaron sensores para el monitoreo de la succión de matriz (sensores de conductividad térmica) y el contenido de agua (usando técnicas FDR) en la cobertura (Williams et al. 2003). Asimismo, se instalaron lisímetros para medir la infiltración de agua.

Los resultados del monitoreo durante siete años indican que la infiltración a través de la cobertura de almacenamiento y liberación de ensayo en el desmorte mineralizado del Botadero Sur ha sido menor en promedio que 0,25% precipitación pluvial incidente, con una infiltración registrada máxima de 1,1% de precipitación pluvial incidente (Williams et al. 2003). Las precipitaciones pluviales anuales registradas, usando la estación meteorológica, han sido 524, 623, 475, 522, 713 y 523 mm, para los años 1996/1997, 1997/1998, 1998/1999, 1999/2000, 2000/2001 y 2001/2002, respectivamente. Se observó empozamiento de agua durante la época de lluvias, pero no se observó ninguna rajadura significativa de la superficie durante las estaciones de estiaje. Las mediciones de contenido volumétrico de agua muestran que diferentes ciclos de lluvias y secado ocurrieron en la cobertura correspondiente a la época de lluvias y de estiaje (ver Figura 7-26). Asimismo, después de cada época de estiaje, el contenido volumétrico de agua de la capa de cobertura inerte rocosa superior se reduce a un mínimo de alrededor de 0,10 (correspondiente a S_r de 0,2), mientras que después de la época de lluvias el contenido volumétrico de agua promedio aumenta a alrededor de 0,35 (S_r of 0,7).

En conclusión, el emplazamiento de Kidston se puede considerar un caso de estudio valioso de una aplicación exitosa de cobertura de almacenamiento y liberación para reducir la producción de drenaje ácido de roca en un clima semiárido (Williams et al. 2003).

Figura 7-26 Contenido volumétrico de agua vs. el tiempo



Contenido volumétrico de agua vs. el tiempo para profundidades seleccionadas por debajo de la superficie de la cobertura en la mina Kidston (de Williams et al. 2003).

7.6 Mina Kristineberg

El área minera de Kristineberg está ubicada en la parte occidental del distrito minero de Skellefte, aproximadamente 175 km al sur-oeste de Lulea en la parte norte de Suecia (ver Figura 7-27). La precipitación anual en el área varía entre 400 y 800 mm, y la temperatura media anual es 0,7°C (Carlson 2000; Carlson et al. 2002).

El yacimiento de Zn-Cu de Kristineberg se descubrió en 1918. Boliden Mineral AB abrió la mina y una planta concentradora en 1940. La planta concentradora cerró en 1991 debido a un tonelaje decreciente para la planta concentradora y los costos crecientes del procesamiento como una consecuencia del cierre de varias minas pequeñas. Los relaves de Kristineberg se han depositado en cinco represas (represas 1, 1B, 2, 3 y 4) a lo largo de un valle pequeño (ver Figura 7-27). En general, la represa está cubierta de nieve a fines de octubre/comienzos de noviembre y a fines de abril/inicios de mayo.

En la Represa 1, el contenido de sulfuro mineral oscila entre 10% a más de 30% en los relaves sin oxidar mientras que este valor es alrededor de 20% en la represa 1B (Öhlander et al. 2004). Los sulfuros minerales están compuestos principalmente de pirita, pero otros sulfuros minerales también están presentes (en forma de pirrotita, esfalerita, calcopirita, galena, covelita y arsenopirita; Moreno y Niretnieks 2004). Las distribuciones del tamaño de grano de estos relaves (ver Figura 7-28) muestran que las partículas son más pequeñas que 1 mm. Alrededor de 75% de las partículas son más pequeñas de 0,1 mm y alrededor de 15% tiene un tamaño menor de 0,01 mm (Moreno y Niretnieks 2004). Las pruebas de estimación de la base ácida (Öhlander et al. 2004) muestran un potencial de acidez (PA) máximo grande puesto que los relaves no oxidados son ricos en pirita y contienen sólo una cantidad menor de carbonatos. Este PA es de alrededor de 302 y 307 kg de calcita por tonelada métrica para las represas 1 y 1B, respectivamente, y el Potencial de Neutralización Neta es alrededor de -301 kg de calcita por tonelada métrica para la Represa 1.

Figura 7-27 Mapa que muestra la ubicación del área de explotación de Kristineberg y la Represa 1 (Carlson 2000)

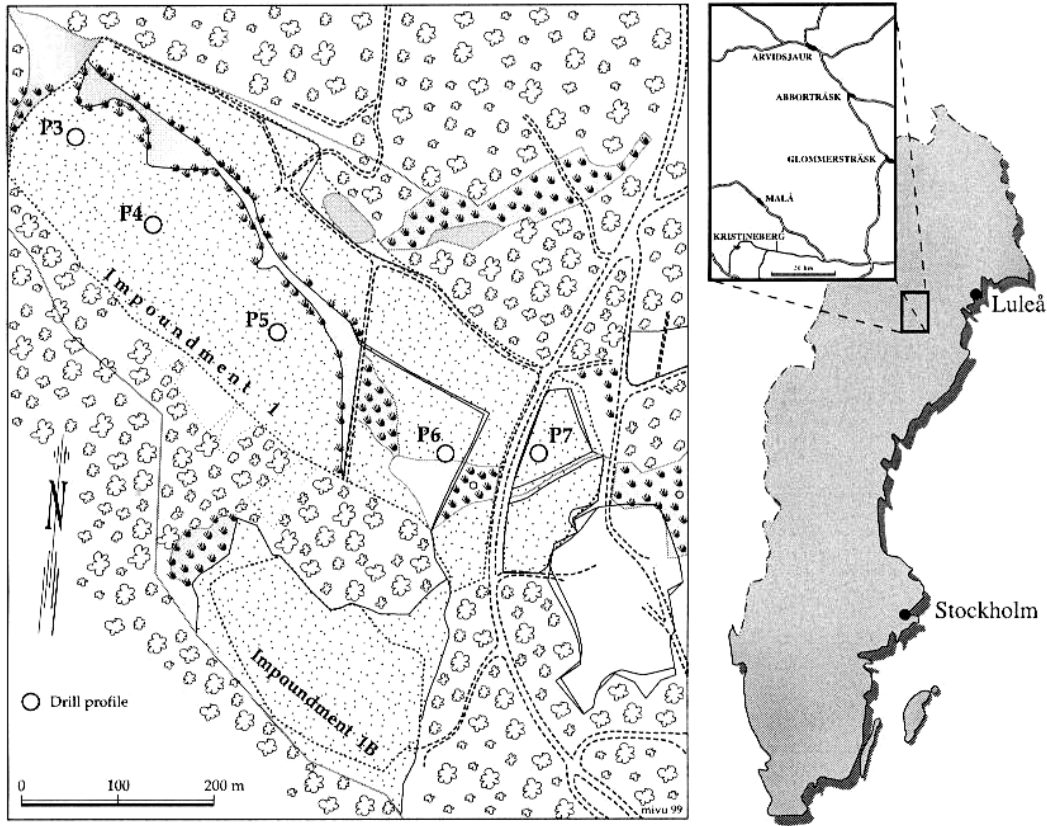
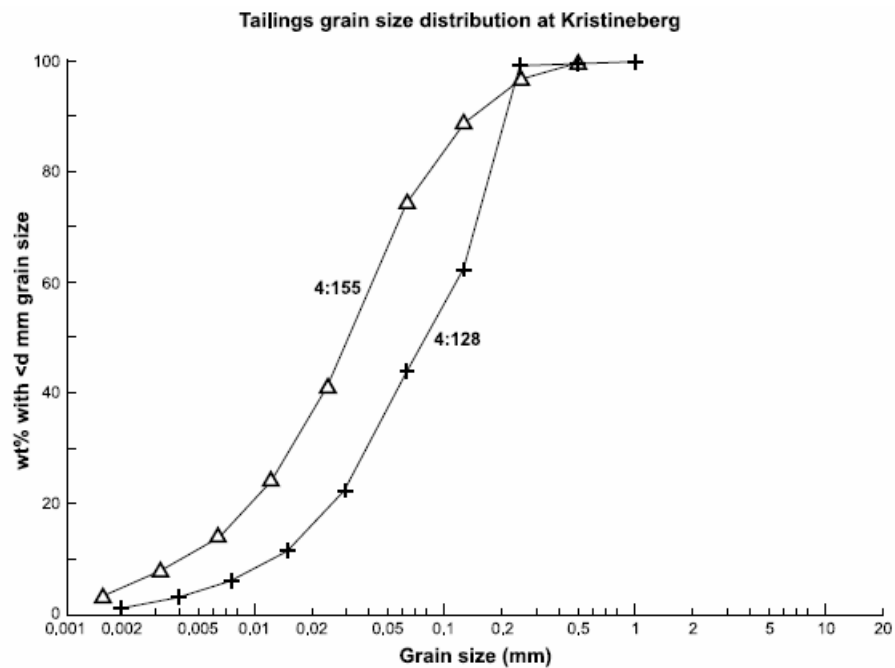


Figura 7-28 Distribución del tamaño de grano de los materiales de relaves



Distribución del tamaño de grano de los materiales de relaves en la mina Kristineberg (de Carlson 2000).

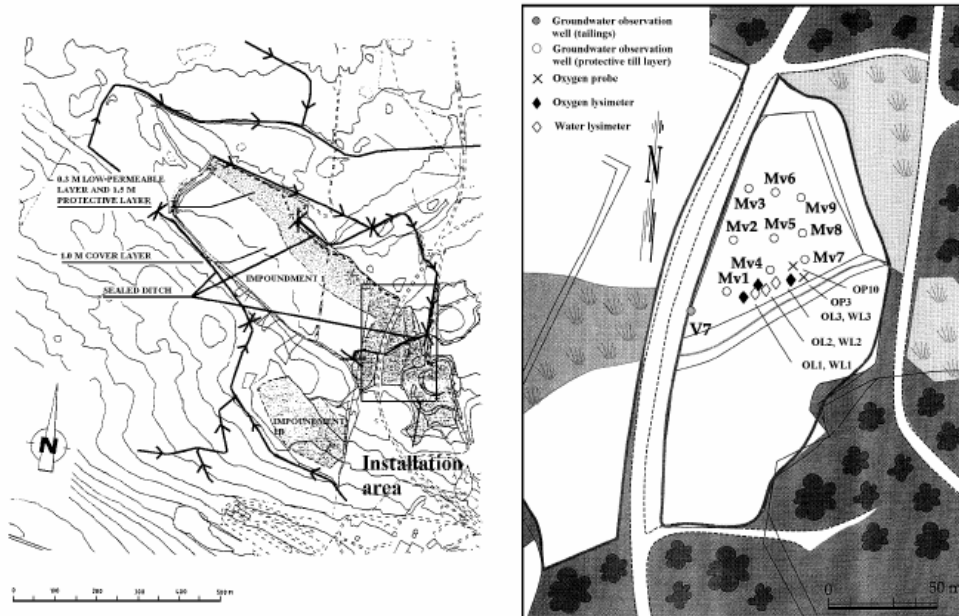
A través del tiempo, se han realizado varios estudios sobre el área de los relaves de Kristineberg, y se han producido documentos valiosos acerca de la geoquímica y la hidrología del emplazamiento (Lindval et al. 1999; MiMi 1998; Öhlander et al. 2004, Carlson et al. 2002; Moreno y Niretnieks 2004). Todos los resultados obtenidos se usaron para elaborar un plan de rehabilitación viable para el área de relaves.

La investigación hidrogeológica mostró que no se puede lograr ni la inundación ni la saturación de aguas subterráneas en la poza 1B y aproximadamente en la mitad del área de la poza 1 (Lindval et al. 1999). El modelamiento hidrogeológico de varias coberturas indicó que la saturación de agua permanente se podía lograr en la cobertura usando una capa selladora de 0,3 m de espesor con una conductividad hidráulica máxima de $5,10^{-9}$ m/s y una capa protectora de 1 m de morrena no especificada. Al implementar dicha cobertura se crearía una superficie subterránea artificial en la capa selladora sobre los relaves, reduciendo de este modo la difusión de oxígeno a los relaves (Lindval et al. 1999). El propósito de la capa protectora es no sólo actuar como capa de almacenamiento de agua y proteger a la capa de sellada del desecamiento, sino también proteger la capa selladora contra la erosión, helada y penetración de raíces. También actúa como medio para que se desarrollen plantas.

Las represas 1 y 1B (ver Figura 7-27) estuvieron cubiertas con morrena en 1996. Los relaves fueron abonados con cal antes de construir la cobertura. En la represa 1B (10 ha), se usaron dos capas de morrena. Se construyó una capa selladora de 0,3 m de espesor de morrena compacta con una conductividad hidráulica saturada máxima de 1×10^{-9} m/s en los relaves, recubierta por una capa protectora de 1,5 m de espesor de morrena no especificada. Este sistema también se usó en la parte nor-este de la represa 1 (aproximadamente la mitad de la represa; Carlson 2000). La otra mitad de la represa se rehabilitó usando una monocapa de 1 m de morrena no especificada. La morrena se construyó durante el invierno cuando la poza estaba congelada. Esta cobertura se colocó como una barrera para el oxígeno y que limitaba la infiltración de agua a los desechos de la mina.

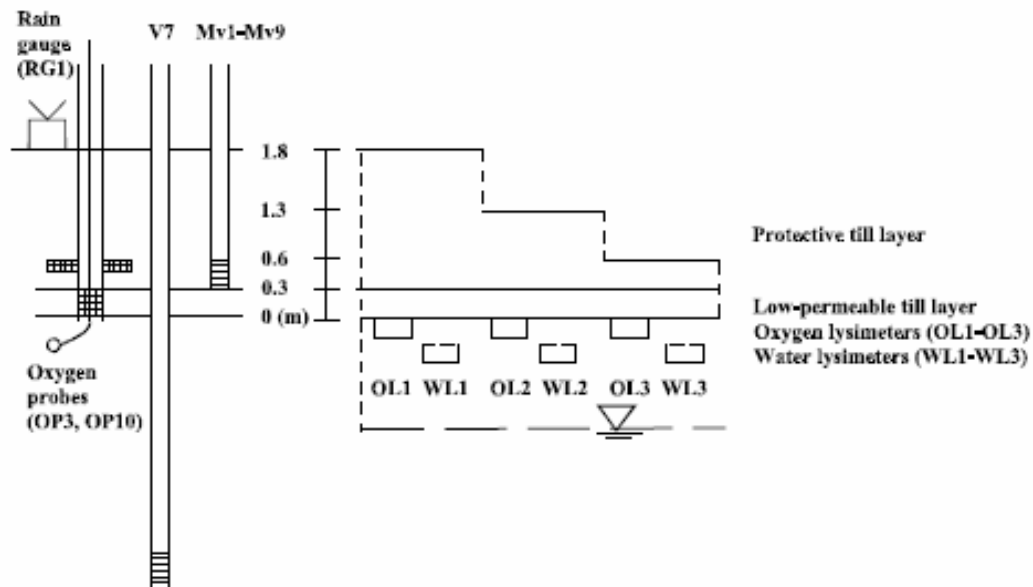
Para cuantificar los flujos de oxígeno y agua a través de la cobertura compuesta, se instalaron instrumentos de campo en el compuesto suelo-cobertura (ver Figuras 7-29 y 7-30). Para la cuantificación del flujo de oxígeno a través de la cobertura, se instalaron tres lisímetros de oxígeno (OL1, OL2 y OL3, ver Figura 7-29 y 7-30) debajo de la capa de morrena de baja permeabilidad, con una profundidad de la capa de morrena protectora que variaba entre 1,5 en OL1 y 0,3 m en OL3 (Carlson 2002; ver Figura 7-29). Alrededor de 0,5 m por debajo de la capa de morrena de baja permeabilidad, se instalaron tres lisímetros de agua (WL1-WL3) para cuantificar la infiltración de agua a través de la cobertura. Se instalaron dos sondas de oxígeno (OP3 y OP10), las cuales se usaron para medir la concentración de oxígeno en fase de gas en los relaves inmediatamente por debajo de la morrena de baja permeabilidad. Se instalaron nueve pozos de observación de agua subterránea (Mv1 a Mv9) en la capa de morrena protectora, cada uno con una rejilla de admisión de agua inmediatamente sobre la capa de morrena permeable (ver Figura 7-29). Una estación meteorológica, incluyendo un medidor de lluvia, también se instaló aproximadamente a 2 km de la Represa 1. El pozo de observación de agua subterránea instalado previamente V7 se usó para medir el nivel de agua subterránea en los relaves (ver Figura 7-29).

Figura 7-29 Represa 1 de los relaves de planta concentradora y ubicación de estaciones de monitoreo



Represa 1 de los relaves de la planta concentradora y la ubicación de las estaciones de monitoreo en la mina Kristineberg (de Werner et al. 2001).

Figura 7-30 Vista Esquemática en Corte de las Instalaciones en la Represa 1



Vista esquemática en corte de las instalaciones en la represa 1 en la mina Kristineberg (de Werner et al. 2001).

El flujo de agua hacia los relaves (sin cobertura) se derivó de la precipitación (lluvia y nieve) y aporte de agua subterránea y superficial. En Kristineberg, aproximadamente 50% de la precipitación se evapora, y no se infiltra en el depósito (Axelsson et al., 1986). Parte de la precipitación también se pierde como escorrentía de superficie, mientras que el resto (alrededor de 15%; aprox. 100 mm/año) se percola a través de la zona no saturada, y finalmente llega a la napa freática (Höglund y Herbert 2004). En

el área nor-este de la Represa 1, en donde se ha instalado una cobertura de suelo de doble capa, el índice de percolación a través de la cobertura de suelo está limitada por la conductividad hidráulica vertical de la capa selladora ($k_z = 1 \times 10^{-9}$ m/s). Para este valor k_z , presumiendo una la capa selladora saturada de agua y que la presión de agua porosa se encuentra en equilibrio con la atmósfera en la base de la capa selladora, la recarga anual de los relaves sería 32 mm/año. No obstante, los estudios de lisímetros de infiltración de campo en Kristineberg han indicado un índice de percolación a través de la capa selladora de aproximadamente 4 mm/año (Carlson 2000). Este índice de percolación baja probablemente se debe al hecho de que el área de prueba usada para este estudio era un poco más compacta con respecto a la capa selladora ordinaria, lo cual genera un valor k_z de alrededor de 5×10^{-10} m/s (Carlson y Elander 2001).

El coeficiente de difusión efectivo calculado y los flujos de oxígeno difusivos se presentan en la Tabla 7-5 (Carlson 2002). Además la cantidad de oxígeno disuelto que ingresa a los relaves se calculó usando los índices de infiltración de agua, asumiendo una concentración de oxígeno en el agua de 10 mg/l. Estos valores se presentan en la Tabla 7-6. Las mediciones indican que el coeficiente difuso efectivo es bajo. Típicamente, el área de prueba con 1,0 m de cobertura muestra un coeficiente de difusión efectiva diez veces mayor que el área con 1,5 y 0,3 m de cobertura protectora. Sin embargo, las mediciones del verano del 2002 mostraron que la cobertura protegida por 0,3 m de cobertura protectora era sensible a la desecación. El área con una capa protectora de 1,5 m parecía no afectada por la desecación.

Las mediciones de las sondas de oxígeno en la parte superior de la capa selladora se realizaron ocasionalmente debido a la napa freática colgada que se forma en la parte superior de la capa selladora que satura las sondas de oxígeno. Como se puede observar en la Figura 7-31, la concentración de oxígeno en la capa protectora medida en marzo de 2000 fue menor de 2%. No obstante, las mediciones de la concentración de oxígeno fueron mayores en el verano del 2002 con valores entre 8 y 20%. Las mediciones de la napa freática colgada mostraron que la concentración de oxígeno en la cobertura parecía relacionada con el nivel del agua subterránea colgada. Esta napa freática colgada, cuando se encuentra cerca de la cobertura, es una barrera efectiva contra la difusión de oxígeno (ver Figura 7-32). También cabe mencionar que debido a las condiciones climáticas, la difusión de oxígeno se concentra principalmente entre mayo y setiembre, con pequeños flujos durante el invierno debido al congelamiento de la cobertura.

Los resultados de estos estudios muestran que la rehabilitación del suelo-cobertura de las represas de relaves puede generar flujos bajos de oxígeno y agua. El monitoreo a largo plazo de niveles de agua subterránea y la concentración de oxígeno permite un mejor entendimiento del rendimiento general de los sistemas de cobertura.

Resumen de Casos Documentados

Tabla 7-5 Resultados de las mediciones de oxígeno en la mina Kristineberg (Carlson 2002)

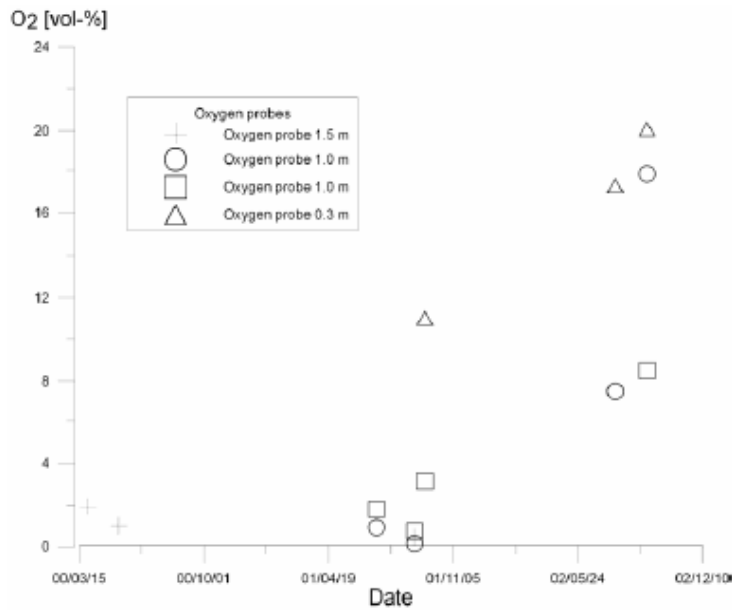
Period:	Days:	Cover:	D [m ² /d]:	F _C [mole O ₂ /m ² , year]:	D _{Average} [m ² /d]:
2000-06-05* to 2000-08-18	74	1.5 m	8.40E-05	0.152	
2000-08-18 to 2000-09-26	39	1.5 m	-1.70E-04		
2000-09-26 to 2001-04-05	191	1.5 m	2.40E-05	0.0435	
2001-04-05 to 2001-05-30	55	1.5 m	1.20E-05	0.0222	3.84E-05
2001-05-30 to 2001-07-05	36	1.5 m	7.10E-05	0.1254	
2001-07-05 to 2001-09-21	78	1.5 m	-5.20E-05		
2001-09-21 to 2001-11-22	62	1.5 m	-2.10E-05		
2001-11-22 to 2002-05-03	161	1.5 m	7.90E-07	0.0014	
2002-05-03* to 2002-07-23	81	1.5 m	4.01E-05	0.0712	
2002-07-23 to 2002-09-12	51	1.5 m	6.22E-05	0.111	5.11E-05
<hr/>					
2000-06-05* to 2000-08-18	74	1.0 m	8.13E-05	0.200	
2000-08-18 to 2000-09-26	39	1.0 m	3.20E-04	0.787	
2000-09-26 to 2001-07-05	282	1.0 m	2.70E-05	0.066	1.40E-04
2001-07-05 to 2001-11-22	140	1.0 m	-2.60E-05		
2001-11-22 to 2002-05-03	161	1.0 m	1.30E-04	0.321	
2002-05-03* to 2002-07-23	81	1.0 m	1.43E-04	0.352	
2002-07-23 to 2002-09-12	51	1.0 m	1.18E-04	0.289	1.30E-04
<hr/>					
2000-06-05* to 2000-08-18	74	0.3 m	2.40E-07	0.00098	
2000-08-18 to 2000-09-26	39	0.3 m	2.10E-05	0.087	
2000-09-26 to 2000-11-14	49	0.3 m	-1.00E-05		
2000-11-14 to 2001-05-30	197	0.3 m	2.80E-05	0.112	5.23E-05
2001-05-30 to 2001-07-05	36	0.3 m	-9.20E-05		
2001-07-05 to 2001-09-21	78	0.3 m	-1.40E-05		
2001-09-21 to 2001-11-22	62	0.3 m	1.60E-04	0.556	
2001-11-22 to 2002-05-03	161	0.3 m	-2.80E-05		
2002-05-03* to 2002-07-23	81	0.3 m	3.18E-05	0.127	
2002-07-23 to 2002-09-12	51	0.3 m	1.91E-04	0.766	1.11E-04

Tabla 7-6 La cantidad de oxígeno disuelto que ingresa a los relaves en la mina (Carlson 2002)

	año]	Infiltración de Agua	Transporte de oxígeno [Mol O ₂ /m ² ,
		Cobertura: [l/m ² , año]	
Lisímetro de infiltración de agua	1,5	1,47	4,61*10 ⁻⁴
	1,0	3,57	1,12*10 ⁻³
	0,3	--	--
Lisímetro de infiltrac. de oxígeno	1,5	1,25	3,92*10 ⁻⁴
	1,0	9,06	2,83*10 ⁻³
	0,3	3,57	1,12*10 ⁻³

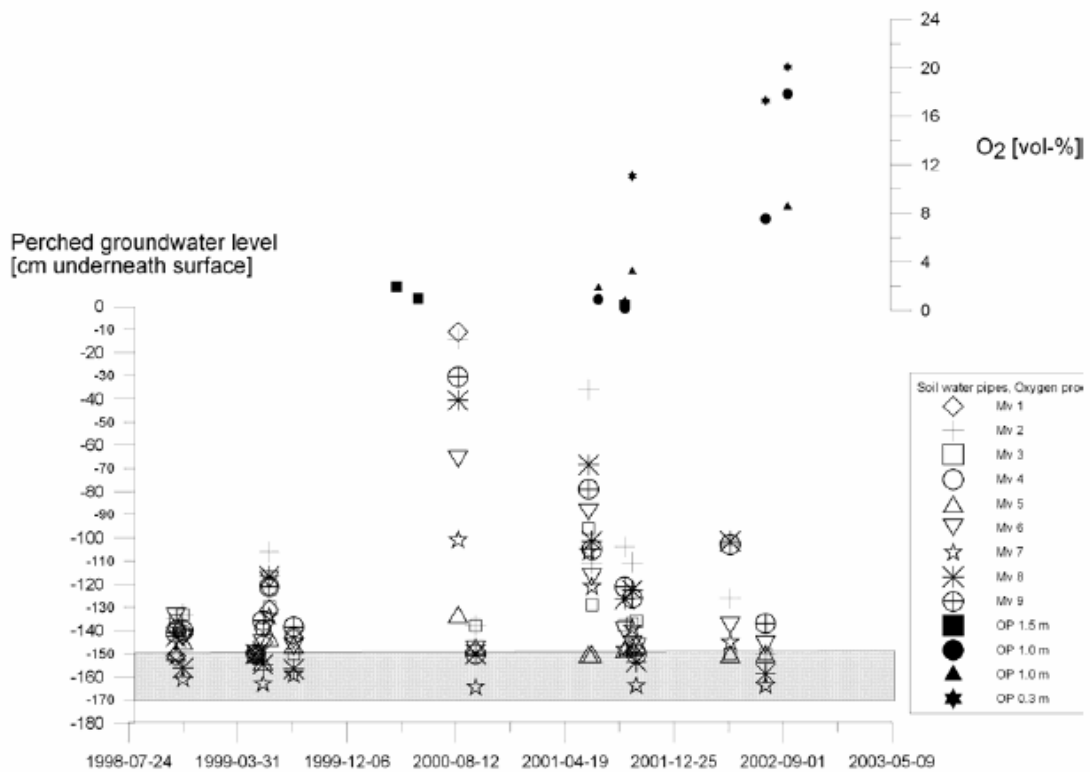
Resumen de Casos Documentados

Figura 7-31 Sondas de Oxígeno



Sondas de oxígeno en la parte superior de la capa selladora bajo distintos grosores de la cobertura protectora en la mina Kristineberg (de Carlson 2002).

Figura 7-32 Mediciones de la Napa Freática Colada



Mediciones de la napa freática colada (Mv1-Mv-9) y la concentración de oxígeno de las sondas de oxígeno en la cobertura protectora en la mina Kristineberg (de Carlson 2002).

7.7 Mina Lorraine

La mina Lorraine está ubicada en la región Témiscamingue a 130 km sur de Rouyn-Noranda, Québec, Canadá (ver Figura 7-33). El clima de esta región se califica como continental moderado, y es similar al que se presenta para el emplazamiento de LTA.

Figura 7-33 Ubicación de la Mina Lorraine



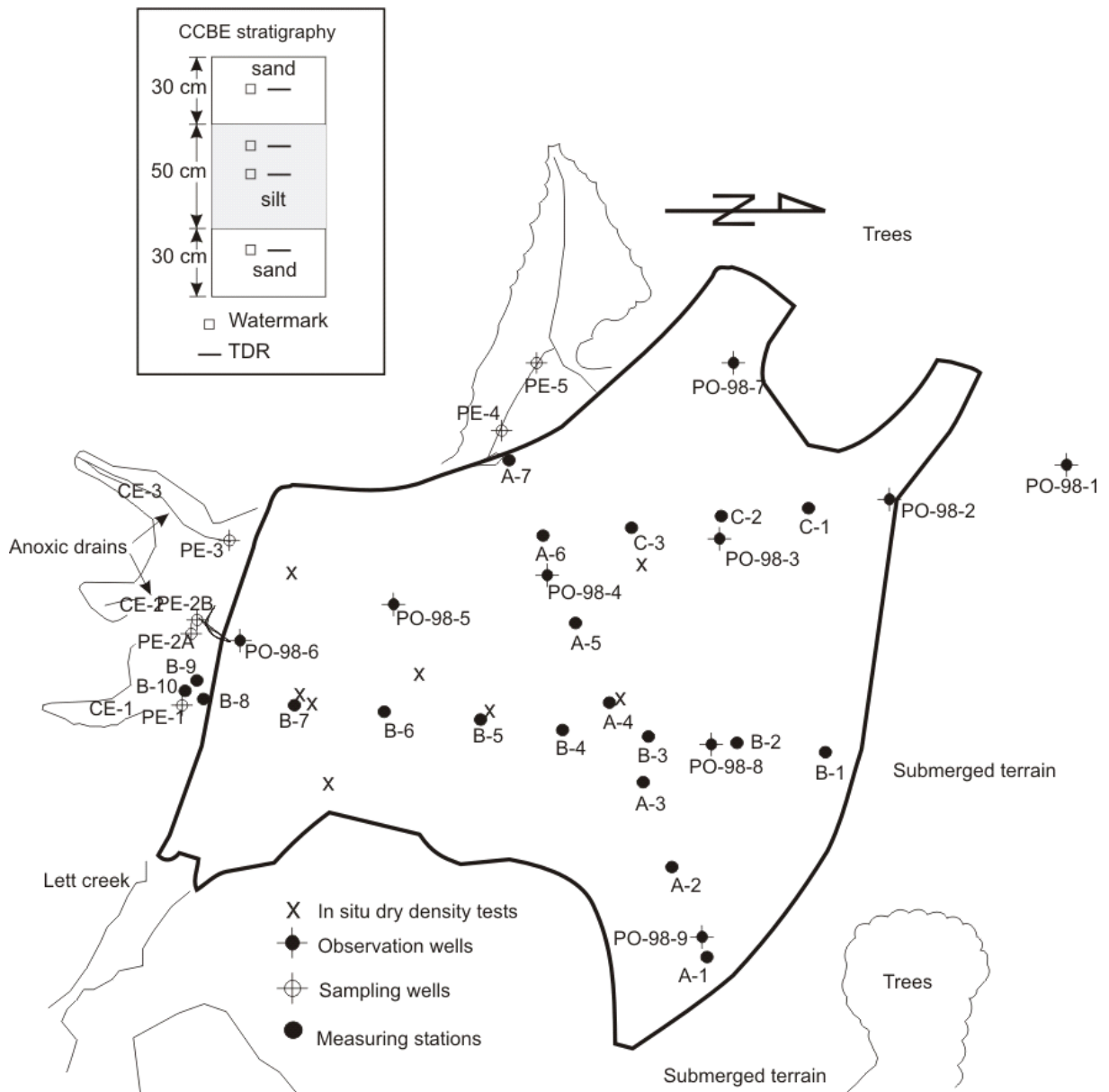
La mina Lorraine operó de 1964 a 1968, tiempo durante el cual aproximadamente 0,6 millones de toneladas de relaves se generaron y dispusieron en un área de poza correspondiente a 15,5 hectáreas. Estos relaves estuvieron expuestos a condiciones atmosféricas durante 30 años, se han oxidado y están generando infiltración de ácido. Luego de un estudio de impacto ambiental y caracterización de los relaves, el Ministerio de Recursos Naturales de Québec decidió en 1997 proceder con el programa de rehabilitación.

El programa de rehabilitación incluyó el remodelamiento de las áreas de relaves, la construcción de una cobertura tipo CEBC sobre los relaves reactivos, la construcción de drenajes de caliza en el efluente final, mejora de la calidad del suelo fuera del área de relaves, y la implementación de un programa de monitoreo. La cobertura diseñada en la mina Lorraine se basa en una serie de análisis numéricos realizados con los códigos numéricos HELP (Schroeder et al. 1994), MODFLOW (McDonald y Harbaugh 1988), SEEP/W (Geoslope Intl 1996) y WATAIL (Scharer et al. 1993). Los análisis numéricos conllevaron al diseño óptimo de costo/eficiencia para la CEBC. Las características usadas en el análisis numérico se definieron en el laboratorio a partir de las muestras tomadas en el lugar. Como muestra la Figura 7-34, la CEBC está compuesta por tres capas (Dagenais et al. 2001; Dagenais et al. 2005; Nastev and Aubertin 2000):

Resumen de Casos Documentados

- una capa base que consta de 0,30 m de arena usada como quiebre capilar
- una capa de limo que retiene humedad, que tiene un espesor de 0,50 m que limitará la difusión de gas y la infiltración de agua;
- una capa superior que consta de 0,3 m de arena y grava usada como capa protectora contra bio-intrusión y evaporación.

Figura 7-34 Configuración de la Cobertura con los Instrumentos Instalados



Configuración de la cobertura con los instrumentos instalados en cada estación de monitoreo (parte superior izquierda) y vista en plano después de la rehabilitación de la mina Lorraine mostrando la ubicación de los instrumentos (Dagenais et al. 2005).

No se ha implementado vegetación en la cobertura, excepto por los taludes de dique en donde ha crecido la vegetación.

La Tabla 7-7 presenta las principales propiedades hidro-geotécnicas para el material granular usado en la capa inferior y en la capa superior y las del material en grano fino

Resumen de Casos Documentados

usado en la capa de retención de humedad. De acuerdo con la clasificación USCS (por ejemplo, Holtz y Kovacs 1981), el material usado en la capa de retención de humedad es un limo inorgánico no plástico (ML) y el material granular es una arena uniforme (SP). Las pruebas de compactación de laboratorio indicaron una densidad seca óptima media de $1\,826\text{ kg/m}^3$ para el limo y $1\,778\text{ kg/m}^3$ para la arena; el contenido de agua óptimo medio es 14,6% para el limo y 16% para la arena. La conductividad hidráulica saturada varía de 2×10^{-6} a 1×10^{-5} cm/s para el limo usado como material que retiene humedad y es alrededor de 7×10^{-3} cm/s para la arena. Las pruebas de succión realizadas en el material de limo mostraron un valor de entrada de aire (ψ_a) que osciló entre 2,9 y 5 m de agua para una relación de huecos entre 0,85 y 0,62. El ψ_a medido para la arena es alrededor de 0,25 m de agua. El contraste entre las propiedades hidráulicas hace posible la creación de un efecto de barrera capilar desarrollada en la CEBC.

Tabla 7-7 Propiedades de los materiales usados en la CEBC de las pruebas de laboratorio previas a la construcción

Propiedades	Limo	Arena
D_{10} (mm)	0,001 a 0,0021	0,06 a 0,15
C_u	5,1 a 7,1	2,5 a 3,33
S_g	2,76	2,70
$\rho_{d\max}$ (kg/m^3)	1 724 a 1 928	1 778
w_{opt} (%)	10,6 a 18,5	16
Conductividad hidráulica saturada (cm/s)	$2,15 \times 10^{-6}$ a $1,1 \times 10^{-5}$ (e = 0,92 a 0,75)	7.2×10^{-3} (e = 0,62)
AEV (kPa)	29 a 50 (e = 0,85 a 0,62)	2.5 (e = 0,62)
D_e (m^2/s)	$3,1 \times 10^{-9}$ ($S_r = 91\%$, e of 0,64)	-

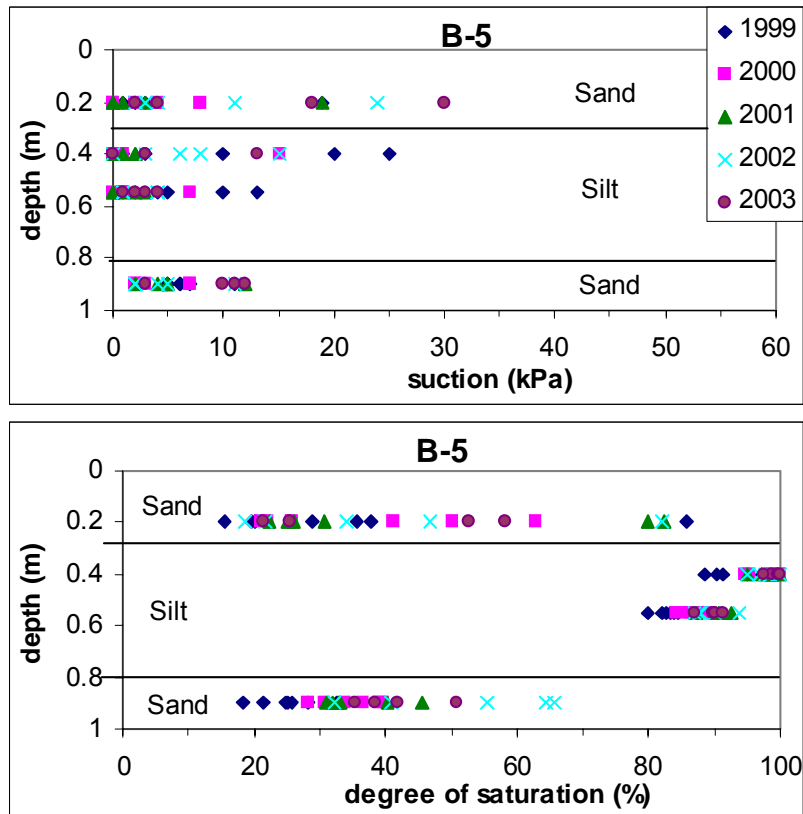
La instalación de instrumentos se realizó en mayo de 1999. Sondeas TDR y sensores Watermark monitorean el contenido volumétrico de agua y la succión en las distintas capas de la cobertura. El flujo efluente final y la calidad también se monitorean. Se han realizado pruebas de consumo de oxígeno a largo plazo esporádicamente para evaluar el rendimiento de la cobertura. La Figura 7-34 muestra una vista en planta y la configuración de la cobertura con todas las estaciones equipadas (20 en total). Las estaciones de monitoreo se instalaron a lo largo de tres líneas que atravesaban el área de poza de relaves. La separación entre cada estación es 50 metros. La línea A va de este a oeste, la línea B va de norte a sur, y la línea C cubre un área húmeda en donde el nivel del agua generalmente es bastante alto. Cada estación incluye cuatro sondas TDR y cuatro sensores Watermark (Irrrometer). Un conjunto de instrumentos de cada estación se colocó horizontalmente en ambas capas de arena, y dos conjuntos en la capa de limo. Mayor información acerca del monitoreo e instrumentación de la cobertura se puede encontrar en Dagenais (2005) y Dagenais et al. (2001, 2005).

Los resultados obtenidos durante el programa de monitoreo permiten una evaluación del comportamiento hidrogeológico de la cobertura y su rendimiento en la reducción del flujo de oxígeno hacia los relaves reactivos. Se tomaron mediciones mensuales de la succión y el contenido del agua durante las estaciones cálidas (sin heladas) de 1999 a 2003. La Estación B-5, presentada en la Figura 7-35, representa el sector sur de la CEBC (ver Figura 7-34 para la conocer la ubicación). Las succiones en la capa de arena inferior oscilan entre 2 y 12 kPa, drenando este material a un grado de saturación entre 20 y 65%. La conductividad hidráulica de arena correspondiente a este contenido de agua típicamente es menor que la del limo y, por ende, restringe el flujo descendente del agua del limo de arriba. Las succiones medidas en el limo varían entre 0 y 25 kPa (por debajo de su valor ψ_a), mientras que su grado de saturación varía de 80 a 100%. El

Resumen de Casos Documentados

monitoreo de la succión y del contenido del agua en este sector indica que los efectos capilares son bien desarrollados y actúan como se ha planificado. El alto grado de saturación en la capa de limo limita de manera efectiva el flujo de oxígeno hacia los relaves (más detalles en Dagenais et al. 2005).

Figura 7-35 Grado de Saturación y Perfiles de Succión para la Estación B-5

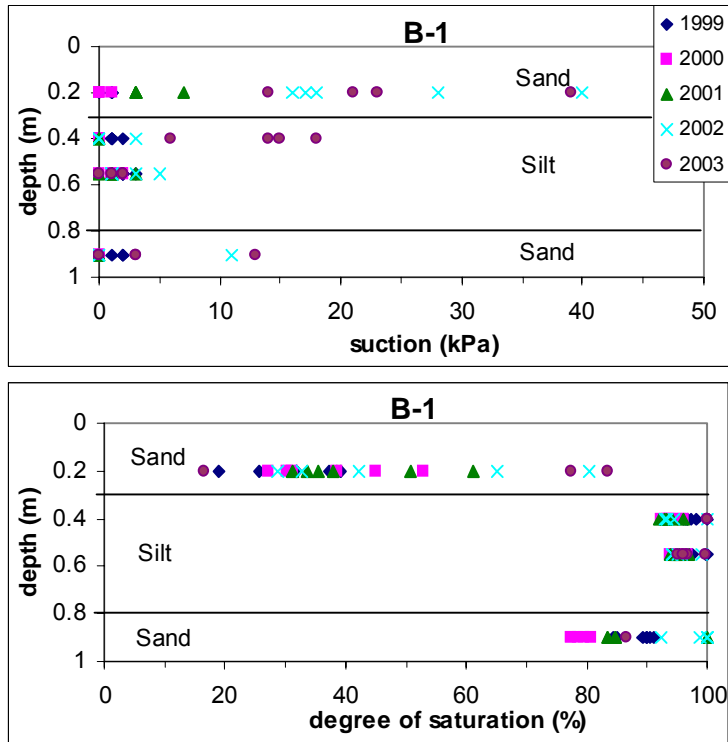


Grado de saturación y perfiles de succión para la Estación B-5 en la mina Lorraine (de Dagenais et al. 2005).

En la parte nor-este de la cobertura, el nivel del agua ha permanecido alto durante todo el periodo de observación, elevándose ocasionalmente a la base de la capa de limo. De este modo, el contenido de agua en la capa de arena inferior es alto, y los efectos de barrera capilar no se pueden desarrollar por completo. Los resultados de monitoreo para la estación B-1 se presentan en la Figura 7-36. Esta estación es típica de la parte nor-este de la cobertura en donde el nivel de agua es alto. Las succiones medidas y mostradas en la Figura 7-36 por lo general son bajas para todas las capas de la CEBC; el valor máximo comúnmente es alrededor de 3 kPa. Algunos valores medidos en la capa de arena superior son una excepción, oscilando entre 7 y 40 kPa, debido a la evaporación durante periodos secos. El grado de saturación correspondiente a estas lecturas oscila entre 75 y 100% para la capa de arena inferior, mientras que supera el 90% para la capa de limo. En la capa de arena superior, la saturación varía entre 20 y 80%, dependiendo de las condiciones atmosféricas. Aunque los efectos de barrera capilar no están desempeñando un papel principal en este sector, debido a que la capa de arena inferior tiene un alto grado de saturación, la capa de limo permanece próxima a la saturación reteniendo el agua capilar tomada directamente de la zona freática. Se considera que el alto grado de saturación observado en el limo y en la capa de arena inferior reduce la afluencia de oxígeno por difusión a los relaves.

Resumen de Casos Documentados

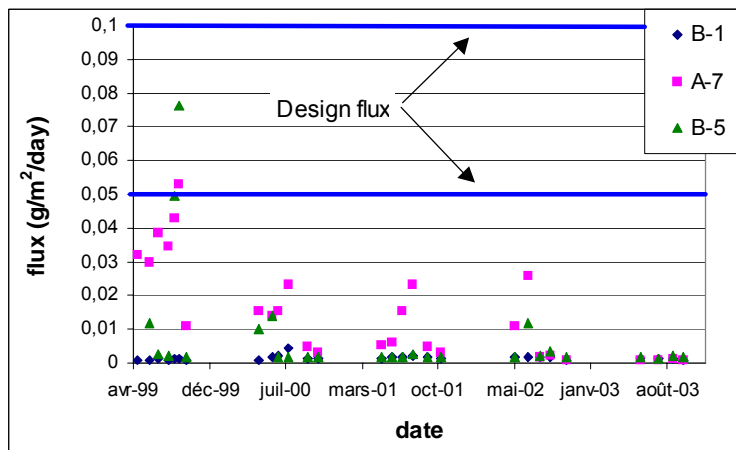
Figura 7-36 Grado de saturación y perfiles de succión para la Estación B-1



Grado de saturación y perfiles de succión para la Estación B-1 en la mina Lorraine (de Dagenais et al. 2005).

Sobre la base de los resultados del contenido volumétrico de agua y las pruebas de consumo de oxígeno a largo plazo, se calculó el flujo de oxígeno a través de la cobertura. El flujo calculado (valores máximos) se encuentra por debajo del rango objetivo de 20 a 40 g/m²/año (o alrededor de 1 mol/m²/año) usado para el diseño de la CEBC (ver Figura 7-37). Por ejemplo, el flujo de oxígeno total para la estación B-1 para los años 1999 a 2003, osciló entre 0,19 y 0,37 g/m²/año (el cual se calculó del 1° de abril al 31 de octubre). Varía de 5,9 a 0,2 g/m²/año para la estación A-7 y desde 8 a 0,3 g/m²/año para la estación B-5 (Dagenais 2005; Dageanis et al. 2005).

Figura 7-37 Flujo de oxígeno diario máximo estimado a través de la CEBC



Flujo de oxígeno diario máximo estimado a través de la CEBC en las Estaciones B-1, A-7 y B-5 en la mina Lorraine (de Dagenais et al. 2005).

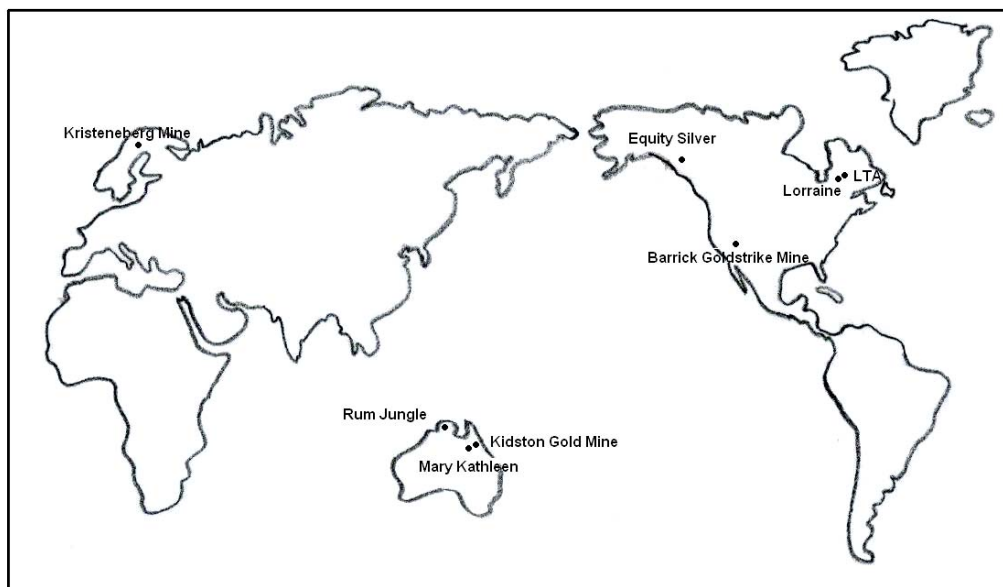
7.8 Conclusión

En este capítulo se presentan siete casos bien documentados de rehabilitación de minas con coberturas: dos en Australia, tres en Canadá, uno en los Estados Unidos y uno en Suecia (ver Figura 7-38). Los emplazamientos presentados no constituyen los únicos casos de rehabilitación de minas en el mundo, pero son las minas más conocidas rehabilitadas con sistemas de cobertura de suelo usando efecto de barrera capilar (CEBC, SR (almacenamiento y liberación) o SDR).

Algunas de estas coberturas se construyeron en climas húmedos para limitar la migración del oxígeno (Lorraine, LTA, Equity Silver, Kristineberg) mientras que otras se construyeron en clima árido o semiárido para reducir la infiltración de agua (Kidston, Goldstrike, Rum Jungle). Asimismo, algunas de estas coberturas se construyeron sobre relaves (Lorraine, LTA, Kristineberg), mientras que otras se construyeron en pilas de desmonte (Equity Silver, Kidston, Goldstrike, Rum Jungle). La Tabla 7-8 resume las características principales de cada emplazamiento rehabilitado con un sistema de cobertura de suelo usando efectos de barrera capilar.

Los diferentes casos presentados en este capítulo muestran que los materiales usados (propiedades y distribución del tamaño de grano), la configuración de la cobertura, y el equipo usado para evaluar el rendimiento de la cobertura son altamente variables. Los rendimientos de estas coberturas usadas en la reducción de AMD (o ARD) también son variables. En algunos casos se observó una degradación de la cobertura, en particular para el caso Rum Jungle (ver Tabla 7-8). Por lo tanto, no hay una receta común para el diseño de una cobertura efectiva en una ubicación particular. Se debe realizar un estudio específico del emplazamiento para cada cobertura luego de los lineamientos presentados en los Capítulos 3 y 4.

Figura 7-38 Ubicación de diferentes casos de estudio de rehabilitaciones de minas



Ubicación de diferentes casos de estudio de rehabilitaciones de minas.

Resumen de Casos Documentados

Tabla 7-8 Resumen de la rehabilitación de diferentes minas

Nombre y área de superficie	Referencias	Ubicación	Configuración	Precipitación	Equipo	Objetivos	Otros comentarios
Equito Silver Área de superficie de 101 ha	Wilson et al. 1997 Aziz y Ferguson 1997	Sur-este de la comunidad de Houston, Col. Brit, Canadá	0,5 m de morrena compacta y 0,3 de morrena no compacta	650 (mm/año)	Sonda de neutrones, sensores de temperatura y permeámetro de Guelph	Limitar la migración de oxígeno y reducir la infiltración de agua	La conductividad hidráulica es mayor de lo que se esperaba
Rum Jungle Área de superficie de 26,4	Timms y Bennet 2000; Taylor et al. 2003	Territorio del Norte, Australia	15 cm de arena de grava y 25 cm de greda arenosa sobre 22,5 cm de arcilla compacta	1 600 (mm/año)	Sonda de oxígeno y Lisímetros	Reducir la infiltración de agua a menos de 5% de lluvia incidente	Deterioro de la cobertura, permeabilidad mayor que la especificada, mayor índice de infiltración
Barrick Goldstrike Mine Inc. Área de superficie de 170 ha	Zhan et al. 2006	Cerca de Elko en la sección norcentral de Nevada, Estados Unidos	1,2 m de cobertura de suelo de grano fino en los taludes orientales en y 1,5 pulgadas de suelo superficial recuperado	260 (mm/año)	Contenido de agua, potencial de presión y lisímetros	Reducir la percolación profunda a través de la cobertura	La percolación profunda promedió de 0,2 a 2,0 mm al año
Les Terrains Aurifères Área de superficie de 60 ha	Ricard et al. 1997; Bussièrè et al. 2003, 2006; Maqsoud et al. 2006	Malartic, nor-oeste de Québec, Canadá	0,5 m de arena, 0,8 de relaves MRN y 0,3 de arena y canto rodado	914 (mm/año)	TDR, watermark de bloque y sonda de oxígeno	Limitar el flujo de oxígeno hacia los relaves reactivos manteniendo una capa que retiene la humedad a $S_r > 85\%$	El rendimiento general de la CEBC superó las expectativas de la fase de diseño y no hay efecto a largo plazo
Mina de Oro Kidston Área de superficie de 310 ha	Williams et al. 2003; Durham et al. 2000; Bews et al. 1997	Sur-oeste de Cairns, muy al norte de Queensland, Australia	0,5 de desmonte ($k_{sat} = 10^{-8} m/s$) y 1,5 m de desecho de óxido rocoso ($n=0.25$)	700 (mm/año)	Succión de matriz, sensor FRD y lisímetros	Reducir la percolación profunda	La infiltración a través de la cobertura a alrededor de 1,1% de lluvias
Mina Kristineberg Área de superficie de 10 ha	Carlson 2000; Carlson et al. 2002	Sur-oeste de Lulean, norte de Suecia	0,3 de morrena compacta y 1,3 de morrena	400 a 800 (mm/año)	Lisímetro	Limitar la infiltración de agua	La baja infiltración de agua y baja concentración de elementos químicos del agua
Mina Lorraine Área de superficie de 28 y 60 ha	Dagenais et al. 2001, 2005; Nastev 2000	Sur de Rouyn-Noranda, Québec, Canadá	0,3 de arena, 0,5 de limo y 0,3 de arena y grava	918 (mm/año)	TDR, sensores watermark y sonda de oxígeno	Limitar el flujo de oxígeno manteniendo una capa que retiene la humedad a $S_r > 85\%$	Alto grado de saturación en la capa que retiene humedad. Los flujos de oxígeno generalmente son menores que el objetivo (o cercanos a éste)

8 REFERENCIAS

- Aachib, M., Mbonimpa, M., and Aubertin, M. (2004). Measurement and prediction of the oxygen diffusion coefficient in unsaturated media, with applications to soil covers. *Water, Air and Soil Pollution*, 156(1-4): 163-193
- Ackman, T.E. (2003). An introduction to the use of airborne technologies for watershed characterization in mined areas. *Mine Water and the Environment*, vol. 22, 62-68.
- Adu-Wusu, C., Yanful, E.K., and Mian, M. H. (2001). Field evidence of resuspension in a mine tailings pond. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 796-808.
- Agricola, G. (1556). *De Re Metallica*. Translated by H.C. Hoover and L.H. Hoover in 1912, (reprinted 1950, Dover Publications. New York).
- Aguirre, A. y Otros. (1995). "Avances de revegetación en Milpo". V convención Regional de Minería del Centro del Perú". Mayo 24 – 27. Huanuco – Perú
- Aguirre, A. y Otros. (1998). "Crecimiento de Pastos Exóticos y de Dos Especies Forestales nativas sobre los relaves de Milpo". Convenio Fundación Peruana para la Conservación de la Naturaleza - Compañía Milpo S.A. Lima - Perú.
- Agus, S. S., and Schanz, T. (2005). Comparison of Four Methods for Measuring Total Suction. *VADOSE ZONE J.*, VOL. 4, 1087 - 1095
- Akindunni, F.F., Gillham, R.W. and Nicholson, R.V. (1991). Numerical simulations to investigate moisture-retention characteristics in the design of oxygen-limiting covers for reactive mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 28: 446-451.
- Albright, W.H., Benson, C.H., Gee, G.W., Roesler, A.C., Abichou, T., Apiwantragoon, P., Lyles, B.F., and Rock, S.A. (2004). Field water balance of landfill final covers. *Journal of Environmental Quality*, 33: 2317-2332.
- Al-khafaf, S., and Hanks, R.J. (1974). Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential. *Soil Sci.*, 117, 194-199.
- Allen, C.G. (1986), Rum Jungle - A Perspective. In: *Proceedings of North Australian Mine Rehabilitation Workshop No. 10 - Environmental Planning and Management for Mining and Energy*, Darwin, NT, June 1986, pp 19-37.
- Amin, M. H.G., Hall, L.D., Chorley, R.J., Richards, K. (1998). Infiltration into soils, with particular reference to its visualization and measurement by magnetic resonance imaging (MRI). *Prog. Phys. Geogr.*, 22(2), 135-165.

Referencias

- Amyot, D. and Vézina, S. (1997). Flooding as a reclamation solution to an acidic tailings pond-the Solbec case. *In* Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver, B.C., 31 May – 6 June, Vol. 2, 451-464.
- Andrieu *et al.* (1962). Mesure en profondeur de la teneur en eau des sols par ralentissement des neutrons rapides. Proceeding of a symposium, Bombay, 26 février-2 mars, I.A.A.A., Vienne, 187-219.
- Aranda Tamayo, F., Coronado Falcón M., Jaramillo Hurtado, V., Sánchez Rojas, G. (2000). “evaluación de los métodos de revegetación utilizados en áreas cubiertas por relaves en minas ubicadas en la sierra del Perú”. Tesis PEGA - Gestión de la Calidad y Auditoria Ambiental. UNALM. Lima. Perú.
- Aranda Tamayo, F., Coronado Falcón M., Jaramillo Hurtado, V., Sánchez Rojas, G. (2000). Evaluación de los métodos de revegetación utilizados en áreas cubiertas por relaves en minas ubicadas en la sierra de Perú” Tesis PEGA - UNALM.
- Asociación Civil para el Desarrollo Forestal. (ADEFOR). (2001) Proyecto Piloto Demostrativo Ambiental. Generación de Tecnologías en Restauración de Áreas con Pastos Altonadinos en Zonas de Explotación minera. – Documento de Sistematización en Cajamarca – Minera Yanacocha- . Organización Ejecutora. Lima Perú. Industrial Papiro S. A. 114p.
- ASTM D2216 (1991). Annual Book of standards, American Society of Testing and Materials.
- Aubertin, M. and Chapuis, R.P. (1991). Considérations hydro-géotechniques pour l'entreposage des résidus miniers dans le nord-ouest du Québec. Compte-rendu de la 2ème Conférence Internationale sur la Réduction des Eaux de Drainage Acides, Montréal. Tome III, 1-22.
- Aubertin, M., Aachib M, and Authier, K. (2000). Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. *Geotextiles and Geomebranes*, **18** : 1-19.
- Aubertin, M., Aachib, M., Authier, K. (2000). Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 215-233.
- Aubertin, M., Aachib, M., Authier, K. (2000). Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. *Geotextiles and Geomembranes*, 18, 215-233.
- Aubertin, M., Aachib, M., Monzon, M., Joanes, A-M., Bussièrre, B. and Chapuis, R. P. (1997). Étude de laboratoire sur l'efficacité des barrières de recouvrement construites à partir de résidus miniers, NEDEM/MEND Report 2.22.2b.

- Aubertin, M., Bussière, B. and Bernier, L. (2002). "Environnement et gestion des résidus miniers." *Les Éditions de l'École Polytechnique de Montréal*, CD-Rom.
- Aubertin, M., Bussière, B., Aachib, M. and Chapuis, R.P. (1996). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. *Hydrogéologie*, 1 : 3-13.
- Aubertin, M., Bussière, B., and Bernier, L. (2002). Environnement et gestion des résidus miniers [Manual on CD-ROM]. Les Presses Internationales Polytechnique, École Polytechnique de Montréal, Que.
- Aubertin, M., Bussière, B., Chapuis, R. P., Bussière, B. (1996). Recouvrements multicouches avec effets de barrière capillaire pour contrôler le drainage minier acide : étude en laboratoire et in situ. Exemple majeurs et récents en géotechniques de l'environnement, Presse de ENPC, Paris, 181-199.
- Aubertin, M., Bussière, B., Joanes, A. M., Monzon, M., Gagnon D., Barbera, J. M., Bédard, C., Chapuis, R. P., Bernier, L. (1999). Projet sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers, Phase II : essais en place, Rapport final soumis au Ministère des Ressources Naturelles, Projet P1899, C.D.T, École Polytechnique, MEND Report 2.22.2c
- Aubertin, M., Bussière, B., Joanes, A.-M., Monzon, M. Gagnon, D., Barbera, J. M., Bédard, C., Chapuis, R.P. Bernier, L. (1999). Projet sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers, Phase II: essais en place. *MEND Report 2.22.2c*, Natural Resources Canada.
- Aubertin, M., Chapuis, R. P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J. F., Tremblay, L. (1995). Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. *MEND/NEDEM Report 2.22.2a*, Natural Resources Canada.
- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J-F., and Tremblay, L. (1995). Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Report 2.22.2a. Secretariat CANMET, Ottawa, Ont.
- Aubertin, M., Chapuis, R.P., Aachib, M., Bussière, B., Ricard, J.F., and Tremblay, L. (1995). Évaluation en laboratoire de barrières sèches construites à partir de résidus miniers. École Polytechnique de Montréal, NEDEM/MEND Projet 2.22.2a.
- Aubertin, M., Ricard, J. F., Chapuis, R. P. (1998). A predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Can. Geotech. J.*, 35, 55-69 [erratum, 36:401 1999].

Referencias

- Aubertin, M., Ricard, J.F., and Chapuis, R.P. (1998). A predictive model for water retention curve: Application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, **35**: 55-69.
- Auzet, A.V., Biron, P., Bouchti A., Sanchez-Perez, J.M., Guth, G. (1996). Mesures de l'humidité des sols à différentes profondeurs au moyen d'une sonde TDR : Intercomparaison avec les mesures neutroniques. Atelier Instrumentation et Expérimentation. METEO -France / INSU, Toulouse, 6p
- Axelsson, C.L., Ekstav, A., Holméa, J., Jansson, T. (1986). Efterbehandling av sandmagasin i Kristinberg, Hydrogeologiska förutsättningar för atgardsplan: Lakvattenbalanser och vittringsberggransande atgarder. Golder Geosystem AB. Abstract in English.
- Aziz, M.L., and Ferguson, K.D. (1997). Étude de cas- la Mine Equity Silver. NRCAN publication (www.nrcan.gc.ca/mms/canmet-mtb/mmsl-lmsm/mend/cases/equity_f/equity_f.htm- verified on February 2006).
- Bell, J.P., Dean, T.J., Hodnett, M.G., (1987). Soil moisture measurements by an improved capacitance technique, Part II. Field techniques, Evaluation and Calibration. *Journal of Hydrology*, 93, 79-90.
- Benson, C., Abicou, T., Albright, W., Gee, G., Roesler, A. (2001). Field evaluation of alternative earthen final cover. *International J. of Phytoremediation*, 3, 105-127.
- Benzaazoua M., Kongolo M., and Bussière B. (2000b). Effect of the granulometry on desulphurization feasibility of mine tailings. *In Proceedings of the 5th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD 2000)*, Denver, Colorado, Soc Mining Metallurgy and Exploration Inc, Littleton, Co., Vol. 2, 853-861.
- Benzaazoua, M. and Bussière, B. (1999). Desulphurization of tailings with low neutralizing potential : kinetic study and flotation modeling. *In Proceedings of the Sudbury '99 Conference, Mining and the Environment II*, Sudbury, Ontario, 13-17 September, *Edited by* D. Goldstack, N. Belzile, P. Yearwood, and G. Hall. Vol. 1, 29-38.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Kongolo, M., Mclaughlin, J., and Marion, P. (2000a). Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 6, 57-74.
- Berkenhagen, J.H., Hickey, C.J., Prasad, S.N., Römkens, M.J.M. (1998). Acoustic observation of a clay during a wetting-drying cycle. *Proceeding of Bouyoucos Conference on Agroacoustics, Third symposium Tishomingo, MS*, 77-89.

- Berthelin, J. (1987). Des bactéries pour extraire des métaux. *La Recherche* 188, 720-725.
- Bews, B., Wickland, B., Barbour, S. (1999). Lysimeter design in theory and practice, *Tailings and Mine Waste* 99, Balkema, Rotterdam, 13-21.
- Bewzs, B.E., O’Kane, M.A., Wilson, G.W., Williams, D.J., Currey, N.A. (1997). The design of a low flux cover system, including lysimeters, for acid generating waste rock in semi-arid environments, in *Proceeding Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, Volume 2, 747-762* (Natural Resources Canada: Ottawa).
- Bienvenu, L. and Dufour, C. (1996). Restauration des sites Somex et Lemoine. *In: Atelier sur les barrières de recouvrement pour rejets miniers générateurs d'eaux acides. Colloque sur le programme de neutralisation des eaux de drainage dans l'environnement minier, NEDEM, Rouyn-Noranda, Vol., 1, 183-195.*
- Binley, A., Daily, W., Ramirez, A. (1997). Detecting leaks from environmental barriers using electrical current imaging. *J. Environ Eng. Geophys.*, 2, 11-19.
- Blackford, M.G., and Harries, J.R. (1985). A heat source for measuring conductivity in waste rock dumps. *Austral. Atomic Energy Commission. Report AAEC/E609.*
- Blight, G. E. (1997). Interactions between the atmosphere and the Earth. *Geotechnique*, 47, 715-767.
- Blowes, D.W. and Ptacek, C.J. (1994). Acid-neutralization mechanisms in inactive mine tailings. *Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Waste*, Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds.). Mineralogical Association of Canada. Special Vol. 22, 272-292.
- Blum, A., Flammer, I., Friedli, T., Germann, P. (2004). Acoustic tomography applied to water flow in unsaturated soils. *Vadose Zone Journal*, 3, 288-299.
- Blumer, F. P., Maurer, Ch. and Steinegger, U. (1994): Use of a Double Fence Intercomparison Reference in High Mountain Areas to correct Precipitation Measurements. 23. *Internat. Tagung für Alpine Meteorologie. Deutscher Wetterdienst. Annalen der Meteorologie*, 30, 43 - 46.
- Bois, D., Poirier, P., Benzaazoua, M., Bussière, B. and Kongolo, M. (2005). A feasibility study on the use of desulphurized tailings to control acid drainage. *CIM Bulletin*, 98, 78 (see CIM web site, <http://www.cim.org>).
- Bording, P.R., Gersztenkorn, A., Lines, L.R., Scales, J.A., Treitel, S. (1987). Application of seismic travel-time Tomography. *Geophy. J.R. Astron. Soc.* 90, 285-303.

Referencias

- Bourget, S.J., Elrick, D.E., Tanner, C.B. (1958). Electrical resistance units for moisture measurements: Their moisture hysteresis, uniformity, and sensitivity. *Soil Sci.*, 86, 298-304.
- Bouyoucos, G.J., and Mick, A.H. (1940). An electrical resistance method for continuous measurement of soil moisture under field conditions. *Tech. Bull N°*, 172. Michigan Agric Exp. Stn., East Lansing, MI.
- Bras, R.L. (1990). *Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Mass.
- Brisco, B., Pultz T. J, Brown R. J, Topp G. C, Hares M. A, Zebchuk W. D. (1992). Soil moisture measurement using portable dielectric probes and time domain reflectometry. *Water Resources Research*, 28, 1339-1246
- Brooks, R.H. and Corey, J.C. (1964). Hydraulic properties of porous medium. Colorado State University (Fort Collins), Hydrology Paper 3.
- Brutsaert, W. (1964). The propagation of elastic waves in unconsolidated unsaturated granular mediums. *J. Geophys. Res.* 69, 243–257
- Burdine, N.T. (1953). Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Petroleum Transaction of the American Institute of Mining Engineering*, 198: 71-77.
- Burrows, W.C. & Kirkham, D. (1958). Measurement of field capacity with a neutron meter. *Soil Science Society proceeding, (United States of America)* pp 103-105.
- Bussière B., Dagenais, A. M., Aubertin, M, Mbonimba, M. (2002). Modification of oxygen-consumption testing for the evaluation of oxygen barrier performance. *Proc., Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences*, Niagara Falls, Ont., CD-Rom, 139-146.
- Bussière B., Dagenais, A. M., Aubertin, M, Mbonimba, M. (2002). Modification of oxygen-consumption testing for the evaluation of oxygen barrier performance. *Proc., Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences*, Niagara Falls, Ont., CD-Rom, 139-146.
- Bussière, B. (1999). Étude du comportement hydrique de couvertures avec effets de barrière capillaire inclinées à l'aide de modélisations physiques et numériques. Ph.D. Thesis, Mineral Engineering Department, École Polytechnique de Montréal, 354 pages.
- Bussière, B., Aubertin, M. Chapuis, R.P. (2003). The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Can. Geotech. J.*, 40(3), 512-535.

Referencias

- Bussière, B., Aubertin, M., and Chapuis, R.P. (2003). The behavior of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 512-535.
- Bussière, B., Aubertin, M., and Chapuis, R.P. (2003). The behaviour of inclined covers used as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 40: 512-535.
- Bussière, B., Aubertin, M., Chapuis, R. P. (2000). An investigation of slope efficiency of capillary barriers to control AMD. *Proc. 5th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD 2000)*, The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Denver, Colorado, vol. 2, 913-920.
- Bussière, B., Lelièvre, J., Ouellet, J., and Bois, D. (1995). Utilisation de résidus miniers désulfurés comme recouvrement pour prévenir le DMA : analyse technico-économique sur deux cas réels. *In Proceedings of Sudbury'95, Conference on Mining and the Environment, Sudbury, Ontario, May 28-June 1, Vol. 1, 59-68.*
- Bussière, B., Maqoud, A., Aubertin, M., Martschuk, J., McMullen, J., Julien, M. (2006). Cover performance at The LTA site, Malartic, Québec, Canada. *Environmental Society of CIM; Accepted for publication.*
- Cabral, A., Racine, I., Burnotte, F., and Lefebvre, G. (2000). Diffusion of oxygen through a pulp and paper residue barrier. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 201-217.
- Cambell Scientific Inc. (2001). Reducing TDR probe rod length to improve water content measurements in soils with high electrical conductivity. App. Note Code: 2S-H Copyright (C) 2001 Campbell Scientific, Inc.
- Campbell, G.S., Gardner, W.H. (1971). Psychrometric measurement of soil water potential: temperature and bulk density effects. *Soil Sci., Soc. Proc.*, 35, 8-12.
- Carlson, E., Thunberg, J., Öhlander, B., Holmström, H. (2002). Sequential extraction of sulphide-rich tailings remediated by the application of till cover, Kristineberg mine, northern Sweden. *The Science of the Total Environment*, 299, 207-226.
- Carlson E. (2002). *Sulphide-rich tailings remediated by soil cover –Evaluation of cover efficiency and tailings geochemistry, Kristineberg, northern Sweden*. Doctorial thesis at Luleå University of Technology, Luleå, Sweden. 2002:44, ISSN1402-*1544, ISRN LTUDT— 102/44—SE.
- Carlson, E. (2000). Geochemical effects of soil cover remediation on sulphide-Rich tailings at the Kristineberg Mine, Northern Sweden. Licentiate Thesis, Univ. Lulea Tekniska, Sweden.

Referencias

- Carlson, E. and Elander, P. (2001). Investigation of repeated cycles of freezing and thawing effects on a clayey till used as sealing layer over sulphide-rich tailings at the Kristineberg mine, Northern Sweden. In *Securing of the Future, International Conference on Mining and the Environment. Proc, Skelleftea, June 25-July1, Vol. I, 58-71*
- Carneiro, C. & de Jong, E. (1985). In situ determination of the slope of the calibration curve of a neutron probe using a volumetric technique. *Soil Science*, 139, 250-254.
- Cary, J.W., Gee, G.W., Simmons, C.S. (1991). Using an electro-optical switch to measure soil water suction. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 55, 1798-1800.
- CENTROMIN PERÚ. (1999). *Centromín y el Medio Ambiente. Temas publicados en el Informativo. Primer Semestre de 1999. Lima - Perú.*
- Chanasyk, D.S., & McKenzie, R.H. (1986). Field calibration of a neutron probe. *Canadian Journal of Soil Science*, 66, 173-176.
- Chandler, R.J., and Gutierrez, C.I. (1986). The filter paper method of suction measurement. *Geotechnique*, 36, 265-268.
- Chanzy, A., Tarussov, A., Judge, A., Bonn, F. (1996). Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1318-1326.
- Chawn, R.H., Eleanor J. Burke, J.E., and Ferré, T.P.A (2003). Measuring Water Content in Saline Sands Using Impulse Time Domain Transmission Techniques. *Vadose Zone Journal* 2:433-439.
- Collin, M. (1987). Mathematical modeling of water and oxygen transport in layered soil covers for deposits of pyritic mine tailings. *Licenciate Treatise. Royal Institute of Technology. Department of Chemical Engineering. S-10044 Stockholm, Sweden.*
- Compañía Minera Buenaventura S.A. (1998). "Informe Técnico de Revegetación en los Depósitos de Relaves 1 y 2". Huachocollpa – Huancavelica. Lima – Perú.
- Cook, FJ, Hicks, W, Gardner, EA, Carlin, GD and Froggatt, DW, (2000). Export of acidity in drainage water from acid sulfate soils. *Marine Pollution Bulletin*, 41, 319-326.
- Dagenais, A. M. (2005). *Contrôle du drainage minier acide basé sur les effets de barrières capillaires. Ph. D. Thesis, Mineral Engineering Department, École Polytechnique de Montréal, Qc.*

Referencias

- Dagenais, A. M. (2005). Contrôle du drainage minier acide basé sur les effets de barrières capillaires. *Ph. D. Thesis*, Mineral Engineering Department, École Polytechnique de Montréal, Qc.
- Dagenais, A. M., Aubertin, M., Bussière, B., Cyr, J. (2005). Performance of the Lorraine site cover to limit oxygen migration. *Proc., SME annual meeting*, Salt Lake City, UT, 1-15, Preprint 05-104.
- Dagenais, A.-M., Aubertin, M., Bussière, B, Bernier, L., Cyr, J. (2001). Monitoring at the Lorraine mine site: a follow up on the remediation plan. *National Association of Abandoned Mine Land Annual Conference*, Athens, OH., CD-Rom.
- Dahlin, T. (2000). Short note on electrode charge-up effects in DC data acquisition using multi-electrode array. *Geophys. Prospect.*, 48, 181-187.
- Dan, J. H. and Topp, G.C. (2002). The soil solution phase. In J. H. Dane and G.C. Topp (eds), *methods of soil analysis, Part 4: Physical methods*, Chapter 3. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI.
- Daniel, D.E. and Koerner, R.M. (1993). Cover systems. *In Proceedings of Geotechnical Practice for Waste Disposal*, Daniel, D.E. (ed.), Chapman & Hall, 455-497.
- Daniel, J.A., Harries, J.R. and Ritchie, A.I.M. (1979). Water movement caused by monsoonal rainfall in an overburden dump undergoing pyritic oxidation. In *International Symposium on environmental Biogeochemistry*, Canberra, Australia. Springer, 623-629.
- Daniel, J.A., Harries, J.R. and Ritchie, A.I.M. (1982). Runoff and seepage from waste rock dump containing pyretic material. *Hydrology and Water Resources Symposium*, Melbourne.
- Danish Wind Industry Association (1997). Wind Speed Measurement Updated. Danish wind Industry Association. <http://www.windpower.org/en/tour/wres/wndspeed.htm>
- Dannowski, G. and Yamaranci, U. (1999). Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectrical measurements. *EJEEG*. 4, 71-85.
- Dasberg S., Hopmans J.W. (1992). Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992;56:1341-1345
- Davidson, J. M., Biggar, J. W., Nielsen, D. R. (1963). Gamma radiation attenuation for measuring bulk density and transient water flow in porous material, *J. Geophysical Res.*, 68, 4777-4785.

Referencias

- Davis, J.L., and Annan, A.P. (2002). Ground penetrating radar to measure soil water content. In: *Methods of Soil Analysis: Physical Properties*, Dane JH, and Topp GC (eds). Soil Science Society of America Book Series, No.5: 446-463. Disponible en <http://vzj.scijournals.org/cgi/content/full/4/4/1096#BIB4#BIB4>
- Davis, J.L., Annan, A.P. (1989). Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551.
- Davy, D.R. (1975). Rum Jungle Environmental studies. Australian Atomic Energy Commission, September 1975 (AAEC/E365)
- De La Cruz Carrasco E. Análisis del cierre de operaciones mineras subterráneas para alcanzar la protección ambiental. Caso: mimosa. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Dean, T. J., Bell J. P, Baty A. J. B. (1987). Soil Moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*, 185:137-146.
- Deka, R.N., Wairiu, M., Mtakwa, P.W., Mullins, C.E., Veenendaal, E.M., Townsend, J. (1995). Use and accuracy of the filter-paper technique for measurement of soil matric potential. *Eur. J. Soil. Sci.*, 46, 233-238.
- Delta-T Devices (1999). Product news. A new equipotensiometer. Available online at <http://www.delta-t.co.uk>. (vérifiée 04 avril 2005).
- DIACONIA. Lima. Perú. 55p.
- Dietrich, P., Fechner, T., Teutsch, G. (1995). Application of tomographic methods to investigate parameters of aquifer. (in German) *Z. Dtsch. Geol. Ges.*, 146, 161-166.
- Dirksen, C. (1999). *Soil Physics Measurements*. GeoEcology Paperback. Catena Verlag GMBH, Reiskirchen, Germany.
- Dirksen, S., and Dasberg, C. (1993). Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 660-667.
- Drake, F.H., Pierce, G.W., Dow, M.T. (1930). Measurement of the dielectric constant and index of refraction of water and aqueous solution of KCl at high frequencies. *Physical Reviews*, 35, 613-622.
- Du, S., and P. Rummel. (1994). Reconnaissance studies of moisture in the subsurface with GPR. p. 1241–1248. *In Proceedings of the Fifth International Conference*

Referencias

- on Ground Penetrating Radar. Waterloo Center for Groundwater Research, Waterloo, ON, Canada.
- Durham, A., Wilson, G. W., Currey, N. (2000). Field performance of two low infiltration cover systems at a semi-arid environment, in Proceeding Fifth International Conference on Acid Rock Drainage, 813-818 Society for Mining Metallurgy, and Exploration Inc. Littleton).
- Edlefsen, N. E. and Anderson, A. B. C. (1943). Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, 15:31-298.
- Elberling, B. and Damgaard, L. R. (2001). Micro-scale measurements of oxygen diffusion and consumption in subaqueous sulfide tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(12), 1897-1905.
- Elberling, B., Nicholson, R. V., Readon, E. J., Tibble, P. (1994). Evaluation of sulphide oxidation rates: laboratory study comparing oxygen fluxes and rates of oxidation product release. *Can. Geotech. J.*, 31, 375-383
- Elomaa, E., (1988). Solid precipitation measurement intercomparison. Final Report of the Third Session, WMO, Geneva, 12 p and appendices.
- ENVIRONMENTAL AUSTRALIA. (1977). Rehabilitación y Repoblación forestal. La mejor practica de gestión ambiental en minería. Medio ambiente Australia. 35p.
- ESPINOZA VILLANUEVA V. (2000). Tolerancia a la toxicidad de Zinc, cobre y plomo en plantas silvestres asociadas a suelos contaminados por la actividad minera. Thesis. Blgo. UNALM.
- Evangelou, V.P. (1995). Pyrite Oxidation and Its Control. CRC Press.
- Evelt, S.R., and Steiner, J.L., (1995). Precision of neutron scattering and capacitance type of soil water content gauges from field calibration. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 961-968.
- Fawcett, R.G., and Collis-George, N. (1967). A filter paper method for determining the moisture characteristic of soil. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.*, 7, 162-167.
- Fayer, M.J., Rockhold, M.L. and Campbell, M.D. (1992). Hydrologic modeling of protective barriers: comparison of field data and simulation results. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 56 : 690-700.
- Feddes, R., Kowalik, P., and Zaradny, H. (1978). *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*, John Wiley and Sons, New York.

Referencias

- Fergusson, A. H. (1959). Movement of soil water as inferred from moisture content measurement by gamma-rays absorption. PhD. Thesis, Washington State University, Pullman.
- Finnigan, J.J. and Brunet, Y. (1995). Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. In: *Wind and Trees*. (Eds Coutts, M.P. and Grace, J.) pp. 3-40. (Cambridge University Press).
- Flammer, I., A. Blum, Leiser, A., Germann, P. (2001). Acoustic assessment of flow patterns in unsaturated soil. *J. Appl. Geophys.* 46:115–128.
- Flores, A. y Malpartida, E. (1980). "Estudios Autoecológicos de las Principales especies forrajeras nativas de los pastizales de Pampas Galeras". Boletín Técnico N° 22 Programa de Forrajes, Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima – Perú.
- Flores, A. (2005). Manual de Pastos y Forrajes Altoandinos. ITDG, OIKOS . Lima Perú. 50p.
- FOMECO S.A. (1999). "Estudio de revegetación con pastos asociados en la cancha de relaves Quiulacocha de la Unidad de Cerro de Pasco". CENTROMIN PERÚ – Resumen de Informe Técnico. Lima – Perú.
- FOMECO S.A. (1999). "Proyectos ambientales realizados por Fomeco S.A". En revista Horizonte Minero. Septiembre – Octubre. Lima – Perú.
- Fort Collins, CO 80525 - EE.UU. (1) 970 223-9600. Agosto de 1997. 197p.
- Fraser, W.W. and Robertson, J.D. (1994). Subaqueous disposal of reactive mine waste : an overview and update of case studies - MEND/Canada. *In Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and 3rd International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Pittsburgh, 24-29 April, United States Department Interior, Bureau of Mines, Special Publication SP 06A-94, Vol. 1, 250-259.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, inc., New York.
- Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31: 521-532.
- Fredlund, D.G., (1992). Background, theory and research related to use the thermal conductivity sensors for matric suction measurement. In: (eds. G.C. Topp, W.D. Reynolds & R.E. Green) *Advance in Measurement of soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. SSSA Special Publication N° 30, 249-261.

Referencias

- Fredlund, D.G., Xing, A., and Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, **31**: 533-546.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*, Prentice-Hall, Engelwoods Cliffs, New Jersey.
- Fujiyasu, Y., Fahey, M., Newson, T. A. (2000). Field investigation of evaporation from freshwater tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**: 556–567.
- Galagedra, L.W., Parkin, G.W., Redman, J.D., von Bertoldi, P., Endres, A.L. (2003). Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage. *Journal of hydrology*, **301**, 182-197.
- Gardner, R. (1937). A method for measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. *Soil Science*, vol. 43, 227-283.
- Gardner, W. & Kirkham, D. (1952). Determination of soil moisture by neutron scattering. *Soil Science*, **73**, 391-401.
- Gardner, W.H. (1986). Water content. In : (eds. A. Klute) *Methods of soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph N° 9 (2nd edn), 493-544.
- Gardner, W.R. (1958). Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, **85** : 228-232.
- Gaskin, G.D., and Miller, J.D. (1996). Measurement of soil water content using simplified impedance measuring technique. *Journal of Agriculture Engineering Research*, **63**, 153-160.
- Gee, G. W., and Ward, A. L. (1997). Still in Quest of the Perfect Cap. In: *Reynolds, T. D., and R. C. Morris (eds.), Landfill Capping in the Semi-Arid West: Problems, Perspectives, and Solutions*, Environmental Science and Research Foundation, Idaho Falls, ID.
- George, B. H. (1999). Comparison of techniques for measuring the water content of soil and other porous media. Master thesis, Université of Sydney, Australia.
- GEO-SLOPE International Ltd. (1996). SEEP/W for finite element seepage analysis, User's guide, Version 3. GEO-SLOPE Int. Ltd. Calgary, Alberta, Canada.

Referencias

- GINOCCHIO R. Y A.J. M. BAKER. (2004). Metalófitas en América Latina: un recurso biológico y genético único y poco conocido y estudiado en la región. En *Revista chilena de Historia Natural* 77:185-194.
- Golder Associates (1996). Construction and instrumentation of a composite cover made of tailings at Les Terrains Aurifères, Québec, Canada. *MEND Report 2.22.4ae*, February 1999.
- Golder Associates (1999). Rapport final de suivi du comportement du recouvrement multicouche Les Terrains Aurifères. *Rapport MEND/NEDEM 2.22.4b*.
- Goodison, B. E. (1978). Canadian snow gauge measurement, accuracy implications, alternatives, needs. *Water stud. Ist., Saskatoon, Saskatchewan*, 7 - 15.
- GRAY D. H. and R. B. SOTIR. (1995). Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization. A practical guide for Erosion control. A Wiley- Interscience Publication. John Wiley & SONS, INC. New York. 378.
- Greacen E. L. and Hignett, C. T. (1979). Sources of bias in the field calibration of a neutron meter. *Australian Journal of Soil Research*, 17, 405-415.
- Greacen, E.L., Correll, R.L., Cunningham, R.B., Johns, G.G., Nicholls, K.D., (1981). Calibration, in: Greacen, E.L. (Ed.), *Soil Water Assessment by the Neutron Method*. CSIRO, Australia.
- Greacen, E.L., Walker, G.R., Cook, P.G. (1987). Evaluation of the filter paper method for measuring soil water suction. *International Conference on measurement of Soil and Plant Water Status*, Logan, UT., Vol. 1, 137-143.
- Grote, K., Hubbard, S., Rubin, Y., (2003). Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques. *Water Resources Research*, 39(11), 1321-1335
- Guerrero B., J. A. (1999). La erosión de los suelos agrícolas. Su prevención y control.
- Hamblin, A.P. (1981). Filter paper method for routine measurement of field water potential. *J. Hydrol.*, 53, 355-360.
- Hamilton, J.M., D.E. Daniel, and R.E. Olson. (1981). Measurement of hydraulic conductivity of partially saturated soils. p. 182–196. *In* T.F. Zimmie and C.O. Riggs (ed.) *Permeability and groundwater contaminant transport*. ASTM Special Technical Publ. 746. ASTM, West Conshohocken, PA.

Referencias

- Hammack, R.W., Sams, J.I., Veloski, G.A., Mabie, J.S. (2003). Geophysical investigation of the Sulphur Bank Mercury Mine superfund site, Lake County, California. *Mine Water and the Environment*, vol. 22, pp. 69-79.
- Haro, L. (1999). "Relaves inestables". En revista *El Ingeniero de Minas*, año 5 número 14 Junio-Julio 1999. Lima – Perú.
- Harrie, J.R. and Ritchie A.IM. (1981). The use of temperature profiles to estimates the pyretic oxidation rate in a waste rock dump from an opencut mine. *Water, Air and Soil pollution*, 15, 405-423.
- Harrie, J.R. and Ritchie A.IM. (1983). Runoff fraction and pollution levels in runoff from a waste rock dump undergoing pyretic oxidation. *Water, Air and Soil pollution*, 19, 155-170.
- Harrie, J.R. and Ritchie A.IM. (1985). Pore gas composition in waste rock dumps undergoing pyretic oxidation. *Soil Science*, 140, (2), 143-152.
- Harrie, J.R. and Ritchie A.IM. (1988). Rehabilitation measures at the Rump Jungle mine site. *Environmental management of solid waste: Dredged material and mine tailings*. Springer-Verlag, New York, NY, 131-151.
- Harries J. R. and Ritchie A. I. M. (1985). Pore gas composition in waste rock dumps undergoing pyritic oxidation. *Soil Science* 140(2), 143-152.
- Heng, L. K., Cayci, G., Kutuk, C., Arrillaga, J. L., Moutonnet P. (2002). Comparison of soil moisture sensors between neutron probe, Diviner 2000 and TDR under tomato crops. 17th WCSS, 14-21 August 2002, Thailand, 1532, 1-9.
- Herkelrath, W. N. and Delin, G. N. (2006). Long-term monitoring of soil moisture in a harsh climate using reflectometer and TDR probes available at <http://mn.water.usgs.gov/bemidji/results/Herkelrath-Delin%20paper.htm> (verified in March 2006)
- Hignett, C., and Evett. S.R. (2002). Neutron Thermalization. In *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 3rd. Agronomy Monograph Number 9.
- Hilhorst, M.A., and C. Dirksen. (1994). Dielectric water content sensors: Time domain versus frequency domain. p. 23–33. *In Proc., Symposium on TDR in Environmental, Infrastructure and Mining Applications*. Northwestern Univ., Evanston, IL. Sept. 1994. Special Publ. SP 19-94. U.S. Dep. of Interior Bureau of Mines, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Hillel, D. (1980). *Fundamental of Soil Physics*. Academic Press, New York.

Referencias

- Hipp, J. E. (1974). Soil Electromagnetic Parameters as Functions of Frequency, Soil Density and Soil Moisture. Proc. of the IEEE **62**:98-103.
- Hodgson, A.S. & Chan, K. Y. (1979). Field calibration on neutron moisture meter in a cracking grey clay. Irrigation Science, 8, 233-244.
- Höglund, L.O. and Herbert, R.B. (Editors) (2004) MiMi – Performance Assessment main report. Report from the MISTRA research program Mitigation of the environmental impact from mining waste (MiMi), MiMi Report 2003:3, MiMi Print, Luleå, 345 p.
- Holmes, J. W. (1956) Influence of bulk density of the soil on neutron moisture meter calibration. Soil Science.
- Holtz, R D and Kovacs, W D, (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering, *Prentice Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series* (Eds: N M Newark and W J Hall), (Prentice-Hall: New Jersey)
- Hubbard, S., K. Grote, and Y. Rubin. (2002). Mapping the volumetric soil water content of a California vineyard using high-frequency GPR ground wave data. The Leading Edge, June, p. 552–559.
- Huisman, J. A. (2002). Measuring soil water content with time domain reflectometry and ground penetrating radar: Accuracy, reproducibility and feasibility. Ph.D. diss. Universiteit van Amsterdam, The Netherlands.
- Huisman, J.A., S.S. Hubbard, J.D. Redman, and A.P. Annan. (2003). Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review. Available at www.vadosezonejournal.org. Vadose Zone J. 2:476–491
- Huisman, J.A., Snepvangers, J.J.J.C., Bouten, W., Heuvelink, G.B.M. (2002). Mapping spatial variation in surface radar and time domain reflectometry. J. hydrology, 269, 194-207.
- Huisman, J.A., Sperl, C., Bouten, W., Verstraten, J.M. (2001). Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. Journal of Hydrology, vol. 245, pp. 48-58.
- Humber, A.J. (1995). Separation of sulphide minerals from mill tailings. In Proceedings of Sudbury'95, Conference on Mining and the Environment, Sudbury, Ontario, May 28-June 1, Vol. 1, 149-158.
- IAEA (2003). Comparison of Soil-Moisture sensors between Neutron and probe, Time-Domain Reflectometry and Capacitance Probe. Report of the FAO/IAEA Final

Referencias

consultants meeting held in Vienna, Austria on 24-28 March 2003, IAEA-311-03CT00028.

Ictinternational (2005). The ICT International Catalogue, available on line at www.ictinternational.com.au (web site verified December 27th 2005).

Instituto Tecnológico Geo Minero de España. (1996). Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Madrid. 331p.

Jackson, T. (1993). Measuring surface soil moisture using passive micro-wave remote sensing. *Hydrol. Processes*, 7, 139-152.

Jacobs P, Sevens E, Kunnen M (1995) Principles of X-ray tomography and applications to building materials. *The Science of the Total Environment* 167: 161 -170

Jacobsen, O.H. and Schjonning, P. (1993a). A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurements including effects of bulk density and texture. *J. Hydrol.*, 151, 147-157.

Jacobsen, O.H. and Schjonning, P. (1993b). Field measurements of soil water content during a drying period using time domain reflectometry and gravimetry. *J. Hydrol.*, 151, 159-172.

Jambor, J. L., Dutrizac, J.E., Groat, L.A. and Raudsepp, M. (2002). Static tests of neutralization potentials of silicate and aluminosilicate minerals. *Environ. Geol.*, Vol. 43, 1-17.

Kachanoski, R.G., E. De Jong, I.J. Van Wesenbeeck. (1990). Field scale patterns of soil water storage from non-contacting measurements of bulk electrical conductivity. *Can. J. Soil Sci.* 70, 537-541

Kaimal J.C. and Finnigan J.J. (1994). *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. (Oxford University Press, New York.) 289pp.

Kamgar, A. Hopmans, J.W., Wallender, W.W., Wendroth, O. (1993). Plot size and sample number for neutron probe measurements in small field trials. *Soil Science* 156:213-224.

Kidston Gold Mines Limited (2000). Closure plan and environmental Report.

Kleinmann, R.L.P., Crerar, D.A., and Pacelli, R.R. (1981). Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation. *Mining Engineering*, Mar'81, 300-304.

Referencias

- Klute, A. and Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. *Methods of Soil Analysis, Part I, 2nd Edition*, A. Klute (ed.), Agron. Monogr. No. 9, ASA and SSSA, Madison, WI, 687-734.
- Kuo, E.Y., Ritchie, A.I.M, Timms, G.P. (2003). Long term monitoring of water infiltration through covers at White's waste rock dump at Rum Jungle mine site using lysimeter. ICARD 2003, Cairns, QLD, 281-286.
- Kwong, Y.T.J. (1993). Prediction and prevention of acid rock drainage from a geological and mineralogical perspective, Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Report 1.32.1. Secretariat CANMET, Ottawa, Ont.
- Lapakko, K.A. (1994). Evaluation of neutralisation potential determinations for metal mine waste and a proposed alternative. *In Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and 3rd International Conference on the Abatement of Acidic Drainage*, Pittsburgh, 24-29 April, United States Department Interior, Bureau of Mines, Special Publication SP 06A-94, Vol. 1, 129-137.
- Lawrence, R.W. and Scheske, M. (1997). A method to calculate the neutralization potential of mining wastes. *Environmental Geology*, 32, 100-106.
- Lawton, M., and Overall, R. (2002). Surface water monitoring, Chapter 3 of Pidsley 2002.
- Lewis, B. and Gallinger, R. D (1999). Poirier site reclamation program. Sudbury 99' Mining and the Environment Conference Proceedings, Vol. 2, 439-448.
- Lindval, M., Eriksson, N., Ljungberg, J. (1999). Decommissioning at Kristineberg mine, Sweden. Sudbury'99, Mining and the environment II, September 13-17 1999; 3, 855-862.
- Lojan Idrobo L. (1992). Arboles y arbustos nativos para el desarrollo Forestal Andino. Proyecto Desarrollo Forestal Participativo en los Andes. El verdor de los Andes. Quito. Ecuador. 217p.
- Madsen, H. B., Jensen, C. R. Boysen, T. (1986). A comparison of the thermocouple psychrometer and the pressure plate methods for determination of soil water characteristic curves. *J. Soil Sci.* 37, 357-362
- Malicki, M. (1983). A capacity meter for the investigation of soil moisture dynamics. *Zesty problemowe Postepow Nauk Rolniczych*, 201-214.
- Maqsoud, A., Bussi re, B., Aubertin, M., McMullen, J., Julien, M., Martschuk, J. (2006). Hydraulic Behaviour of an Oxygen Barrier Used to Control Acid Generation at

Referencias

the LTA Site, Québec, Canada. Submitted to *Journal of Geotechnical and Geological Environment, ASCE*

- Maqsoud, A., Bussière, B., Mbonimpa, M., Cissokho, F., Aubertin, M. (2005). Suction break to control slope-induced moisture variation in layered covers. *Proc., 58th Canadian Geotechnical and 6th joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences*, CD Rom, Saskatoon, Sask.
- Martin V. (2005). Evaluation of disposal methods for potentially acid generating waste rock dumps. MS Thesis of école polytechnique de Montréal.
- Martin, V., Aubertin, M., Bussière, B., Chapuis, R.P. (2004). Evaluation of unsaturated flow in mine waste rock. *57th Canadian Geotechnical Conference and the 5th joint CGS-IAH Conference*, 24-27 October 2004, Québec City, Session 7D, pp.14-21.
- Martin, V., Aubertin, M., Zhan, G., Bussière, B., Chapuis, R.P. (2005). An investigation into the hydrological behaviour of exposed and covered waste rock dumps. *SME Transactions* **318**: 139-146.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M., and Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40 : 916-932.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Aachib, M., Bussière, B. (2003). Diffusion and consumption of oxygen in unsaturated cover materials. *Can. Geotech J.*, 40, 916-932.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Dagenais, A. M., Bussière, B., Julien, M., Kissiova, M. (2002). [Interpretation of field tests to determine the oxygen diffusion and reaction rate coefficients of tailings and soil covers.](#) *Proc., Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences*, Niagara Falls, Ont., CD-Rom, 147-154.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M., Dagenais, A. M., Bussière, B., Julien, M., Kissiova, M. (2002). [Interpretation of field tests to determine the oxygen diffusion and reaction rate coefficients of tailings and soil covers.](#) *Proc., Canadian Geotechnical Conference and 3rd joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences*, Niagara Falls, Ont., CD-Rom, 147-154.
- McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p.

Referencias

- McKenzie, D.C. (1990). Field calibration of a neutron-gammas probe in three agriculturally important soils of the lower Macquarie valley, Aust. J., Expl., Agric., 30, 115-122.
- McLaughlin, J. and Stuparyk, R. (1994). Evaluation of low sulphur rock tailings production at INCO's Clarabelle mill, *In Proceedings of the Innovations in Mineral Processing Conference*, Sudbury, Ontario. *Edited by T. Yalcin*, June 6-8, 129-146
- McMullen, J., Firlotte, R., Knapp, R. Aubertin, M. (1997). Les Terrains Aurifères property site closure and rehabilitation - conceptual to construction. *Proc., 29th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, Ottawa, 274-292.
- Melounou, J. (1998). Instrumentation en géographie physique. Rapport de Mémoire de maîtrise, université Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- MEND (2004). Design, construction and performance monitoring of covers systems for waste rock and tailings. MEND 2.21.4, Volume 5, Case Studies. OKC Report No. 702-01. Natural Resources Canada.
- MEND Report (2001). *Manual Vol. 4. Prevention and control*. G.A. Tremblay and C.M. Hogan, eds, CANMET, Ont.
- Michelena, R.J., and Harris, J.M. (1991). Tomographic travel time inversion using natural pixels. *Geophysics*, 56, 635-644.
- Millington, R.J., and Quirk, J.P. (1961). Permeability of porous solids. *Faraday Soc. Trans.* **57**: 1200-1206.
- Millington, R.J., and Shearer, R.C. (1971). Diffusion in aggregated porous media. *Soil Science*, **111**: 372-378.
- MiMi (2004). *MiMi-Performance Assessment Main report*. Mitigation of the environmental impact from mining waste. MiMi 2003:3. Editors: Höglund L.O. and Herbert R.. Publisher: MiMi-print, Luleå, Sweden. ISSN 1403-9478, ISBN 91-89350-27-8. www.mistra.org/mimi (November, 2005)
- Ministerio de Educación de Chile. (1999). Guía didáctica de educación ambiental, Minería y Medio Ambiente. Enseñanza media – Técnica Profesional. Chile. 45p.
- Ministerio de Energía y Minas. Dirección General de Asuntos Ambientales. Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina. Lima Perú. Elaborado por. Eerik A. Renta y Shepherd Miller, Inc.

Referencias

- Ministerio de Energía y Minas (1995). Republica del Perú. Guía ambiental para la revegetación de áreas disturbadas por la industria minera metalúrgica. Dirección general de asuntos ambientales. Sub Sector Minería. Volumen VIII. Lima Perú. 71P.
- Molson, J. W., Aubertin, M., Bussière, B., Joanes, A. M. (2004). Simulating acid mine drainage through mine wastes constructed with capillary barrier covers. Proc., 57th Canadian Geotechnical and 5th joint IAHCNC and CGS Groundwater Specialty Conferences, CD Rom, Québec City, QC, 8D, 29-36.
- Morel-Seytoux, H.J. (1992). The capillary barrier effect at the interface of two soil layers with some contrast in properties. HYDROWAR Report 92.4, Hydrology Days Publications, 57 Shelby Lane, Atherton, CA 94027-3926.
- Moreno, K., and Niretnieks, I. (2004). Performance assessment – calculations of release and transport of contaminants. MiMi report, ISSN 1403-9478 ISBN 91-89350-37-5
- Morin, K.A. and Hutt, N.M. (1997). Environmental Geochemistry of Minesite Drainage : Practical Theory and Case Studies. MDAG Publishing, Vancouver.
- Morris, C.E. and Stormont, J.C. (1997). Capillary barriers and Subtitle D covers: estimating equivalency. Journal of Environmental Engineering, 123: 3-10.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12: 513-522.
- Mualem, Y. (1986). Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. Methods of Soil Analysis, Part I, 2nd Edition, A. Klute (ed.), Agron. Monogr. No. 9, ASA and SSSA, Madison, WI, 799-823.
- Munier-Lamy, C., and Berthelin, J. (1987). Formation of polyelectrolyte complexes with the major elements Fe and Al and the trace elements U and Cu during heterotrophic microbial leaching of rocks. Geomicrobiol. J. 5, 119-147.
- Muñoz-Carpena R. (2004). Field Devices for Monitoring Soil Water Content Bulletin N° 343, Department of Agricultural and Biological Engineering, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Nakashima, M., M. Inoue, K. Sawada and C. Nicholl. (1998). Measurement of soil water content by amplitude domain reflectometry (ADR) method and its calibrations. Chikasui Gakkaishi (Bulletin of the Japanese Association of Groundwater Hydrology) 40: 509-519.

Referencias

- Nastev, M., and Aubertin, M. (2000). Hydrogeological modeling for the reclamation work at the Lorraine mine site Québec, *Proc. 1st Joint IAH-CNC-CGS, Goundwater Speciality Conference*, Montréal, 311-318.
- Newson, T.A. and Fahey, M. (1997) Site investigation on active tailings deposits using a hovercraft. *Australian Geotechnical Journal*, June, 45-55.
- Nicholson, R. V., Gillham, R. W., Cherry, J. A., and Reardon, E. J. (1989). Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. *Canadian Geotechnical Journal*, 26: 1-8.
- Njoku, E. G. and Kong, J. A. (1977), Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture. *J. Geophys. Res.*, 82, 3108-3118.
- O’Kane, M., Wilson, G.W., and Barbour, S.L. (1998). Instrumentation and monitoring of an engineered soil cover system for mine waste rock. *Canadian Geotechnical Journal*, **35**: 828-846.
- Öhlander, B., Carlson, E., Holmström, H., Elander, P. (2004). Characterization of the tailings and till cover in impoundment 1 and 1B, Kristineberg mine, Northern Sweden, MiMi Report 2001:2 ISSN 1403-9478, ISBN 91-89350-16-2
- O’Kane, M., Wilson, G W; Barbour, S L.(1998). Instrumentation and monitoring of an engineered soil cover system for mine waste rock. *Rev. Can. Geoth*, 35, 828-846
- Palomino, F. (1999). “CENTROMIN Lidera proceso de remediación ambiental en el país”. En Revista “El informativo” Centromin Perú. Primer semestre.
- Paloscia, S., Macelloni, G., Pampaloni, P., Ruisi, R., Santi, E. (2001). Microwave soil moisture monitoring in the Toce valley. *Phys. Chem. Earth*, vol. 26, no 5-6, pp. 377-381.
- Parkin, G., Redman, D., von Bertoldi, P., and Zhang, Z. (2000). Measurement of soil water content below a wastewater trench using ground penetrating radar. *Water Resources Research*, 36(8): 2147-2154.
- Peinado M. (1977). *Avances en evaluación de impacto ambiental Eco auditoria*. Editorial Trotta S.A. Madrid España.
- Penman, H.L. (1948). Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*. 193: 120-146.
- Perkins, E.H., Nesbitt, H.W., Gunter, W.D., St-Arnaud, L.C. and Mycroft, J.R. (1995). Critical review of geochemical processes and geochemical models adaptable for

Referencias

prediction of acidic drainage from waste rock. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Report 1.42.1. Secretariat CANMET, Ottawa, Ont.

Pineda, E. (1999). *Avances en Evaluación de Impacto Ambiental y Eco Auditoría*. Editorial Trotta S.A. Madrid – España.

Rasmuson, A. and Erikson, J.C. (1986). Capillary barriers in covers for mine tailings dumps. Report 3307, The National Swedish Environmental Protection Board, Stockholm, Sweeden.

Rawlins, S. L. and Dalton, F. N. (1967). Psychometric measurement of soil water potential without precise temperature control. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31: 297-300.

Reardon, E.J., and Moddle, P.M. (1985). Gas diffusion coefficient measurements on uranium mill tailings: implication to cover layer design. *Uranium*, 2: 111-131.

Redman, J.D., Davis, J.L., Galagedara, L.W., Parkin, G.W. (2002). Field studies of air launched GPR surface reflectivity measurements of soil water content, in Koppenjan, S.K., Lee, H. (Eds.), *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar Proceedings of SPIE 4758*, 156-161.

Reginato, R.J., and van Bavel, C.H.M. (1964). Soil water measurement with gamma attenuation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 28, 721-724.

Revista Horizonte Minero 33. Mayo junio (2005). Milpo 56 años construyendo desarrollo par el país. www.Perúmine.com.

Reynolds, S.G. (1970a). The gravimetric method of soil moisture determination part II: typical required sample sizes and methods of reducing variability. *J. Hydrology*. Vol. 11, pp. 274-287.

Reynolds, S.G. (1970b). The gravimetric method of soil moisture determination part III: an examination of factors influencing soil moisture variability. *J. Hydrology*. Vol. 11, pp. 288-300.

Ricard, J. F., Aubertin, M., Firlotte, F. W., Knapp, R. McMullen, J. (1997). Design and construction of a dry cover made of tailings for the closure of Les Terrains Aurifères site, Malartic, Québec, Canada. *4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, 4, 1515-1530.

Ricard, J. F., Aubertin, M., Pelletier, P., Poirier, P. McMullen, J. (1999). Performance of a dry cover made of tailings for the closure of Les Terrains Aurifères site, Malartic, Québec, Canada. *Proc Sudbury '99 Mining and Environment*, Sudbury, ON, 2, 155- 164.

Referencias

- Ricard, J.F., Aubertin, M., Firlotte, F.W., Knapp, R., McMullen, J., and Julien, M. (1997). Design and construction of a dry cover made of tailings for the closure of Les Terrains Aurifères Site, Malartic, Québec, Canada. In: Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage. Vancouver, British Columbia. Vol. 4, pp. 1515-1530.
- Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous medium. *J. Physics*. 1 : 318-333.
- Ritcey, G.M. (1989). Tailings Management, Problems and Solutions in the Mining Industries. Elsevier.
- Ritchie, A.I.M. and Bennett, J. W. (2003). The Rum Jungle Mine – A Case Study. *In Environmental Aspects of Mine Wastes* (Eds: J L Jambor, D W Blowes and A I M Ritchie). Mineral Assoc Can Short Course Vol. 31, pp 385-405.
- Ritchie, J.T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8:1204–1213.
- Ritchie, P.J., and Currey, N.A. (2000). Tailings dam rehabilitation at Kidston Gold Mines, in Proceedings ANCOLD 2000.
- Robert C.R. and Scanlon, B.R. (2003). Soil Water Content Monitoring Using Electromagnetic. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(11), 1028-1039.
- Robinson D.A., Bell J.P. and Batchelor C.H., (1994). The influence of iron minerals on the determination of soil water content using dielectric techniques. *J. of Hydrology* 161:169-180.
- Robinson, D. A., Schaap, M.G., Or, D., Jones, S.B. (2005). On the effective measurements frequency of time domain reflectometry in dispersive and nonconductive dielectric materials. *Water Resour. Res.* Vol. 41, W02007, doi:10.1029/2004WR003816.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D., Friedman, S.P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. Available at www.vadosezonejournal.org. *Vadose Zone J.* 2:444–475.
- Robinson, M., and Dean, T. J. (1993). Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. *Hydrological Processes*, 7, 77-86.
- Rolston, D. E. (1986). Gas flux. *In* A. Klute (ed.), *Method of Soil Analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 1103-1119.

Referencias

- Rolston, D.E. (1986). Gas flux. p. 1103–1119. *In* A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Roncal Rabanal M. R. (2004). Respuesta del pino (*pinus patula* Schl. Et Cham) y Quinual (*Polilepys racemosa* Ruiz & Pav) a la aplicación de micorrizas y un bioestimulante en suelos para revegetación de zonas mineras (Yanacocha – Cajamarca). Tesis. Mg Sc. Ciencias Ambientales – UNALM. 77p.
- Roth, C. H., Malicki, M.A., Plagge, R. (1992). Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Soil Science*, 43, 1-13.
- Rowe, R.K., Quigley, R.M., Brachman, R.W.I., and Booker, J.R. (2004). *Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*, Taylor & Francis Books Ltd (E & FN Spon) London, 587 p.
- Rykaart, E.M., Wilson, G W, Currey, N., Ritchie, P. (2003). Final Closure Water Balance of a Tailings Impoundment Using Direct Vegetation. *Proceeding of the 6th ICARD*, Cairn, QLD, 12-18 July 2003, 363-371.
- Rykaart, E.M., Wilson, G.W., Currey, N., Ritchie, P. (2002). Case study-Final closure water balance of tailings impoundment using direct vegetation. *Proceeding of the 6th ICARD*, Cairn, QLD, 12-18 July 2003, 363-371.
- Scanlon, B. R., Andraski, B. J., Bilskie, J. (2002). Chapter 3. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential, *in* Dane, J. H., and Topp, G. C., eds., *Methods of soil analysis, part 4, physical methods*: Soil Science Society of America, Inc., No. 5, p. 643–670.
- Scharer, J.M., Annable, W. K., Nicholson, R.V. (1993). WATAIL 1.0 User's manual: a tailings basin model to evaluate transient water quality of acid mine drainage, Institute for Groundwater Research, 69 p.
- Scharer, J.M., W.K. Annable, R.V. Nicholson (1993). WATAIL 1.0 User's manual: a tailings basin model to evaluate transient water quality of acid mine drainage, Institute for Groundwater Research, 69 p.
- Scheiner B.J., TD Chatwin, H. El-Shall, S.K. Kawatra and A.E. Torma. (1995). *Remediation Technology in the Changing Environmental Arena*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, inc. Littleton, Colorado. USA. 235p.
- Schmugge, T. (1985). Remote sensing of soil moisture. p. 101–124. *In* M. Anderson and T. Burt (ed.) *Hydrological forecasting*. John Wiley and Sons, New York.

Referencias

- Schroeder, P.R., Lloyd, C.M., Zappi, P.A. and Aziz, N.M. (1994). The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model : Engineering Documentation (Version 3. EPA/600/9-94/xxx).
- SENES (1995). A review of AMD Control Strategies for Les Terrains Aurifères, Malartic Ltée. Barrick Gold Corporation Internal Report, July 1995.
- Sevruk, B. (1986). Correction of precipitation measurements: Summary report. ETH/IAHS/WMO Workshop on the Correction of Precipitation measurements. Zurich, 1. - 3. April 1985, B. Sevruk (ed.), Zürcher Geographische Schriften, 23, 13 - 23.
- Shackelford, C.D. (1991). Laboratory diffusion testing for waste disposal. A review. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7: 117-120.
- Shaw, B.S. and Baver, L.D. (1939). An electrothermal method for following moisture changes of the soil in situ. *Soil Sci.* pp. 78-83.
- Sheets, K.R., and J.M.H. Hendrickx. (1995). Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resources Research* 31:2401-2409.
- Sherlock, E.J., Lawrence, R.W., and Poulin, R. (1995). On the neutralization of acid rock drainage by carbonate and silicate minerals. *Environmental Geology*, 25,43-54.
- Shock, C. C., David, R. J., Shock, C. A., Kimberling, C. A. (1999). "Innovative, automatic, low-cost reading of Watermark soil moisture sensors." *Proc., International Irrigation Show*, Orlando, FL ,147-152
- Shock, C.C., Feibert, E.B.G., Jaderholm, S. (2002). A Comparison of Six Soil Moisture Sensors. Oregon State University, Mahler Experiment Station, Special Report 1038: 262-267.
- Shutko, A.M. (1992). Soil-vegetation characteristics at microwave wavelengths, Chapter, Terra-1 : understanding the terrestrial Environment. The role of the Earth Observation from Space, Taylor & Francis, London-Washington D.C., 53-66.
- Simms, P.H., Yanful, E.K., St-Arnaud, L., and Aubé, B. (2001). A laboratory evaluation of metal release and transport in flooded preoxidized mine tailings. *Applied Geochemistry*, 15, 1245-1263.
- Skaling, W. (1992). Trase: a product history. *SSSA Spec. Publ., Soil Sci. Am. J.*, 30, 187-207.

Referencias

- Spaans, E.J.A., and Baker, J.M. (1992). Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature. *Plant Soil* 143:213–217.
- Spanner D. C. (1951). The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure *J. EXP. Bot.* 2, 145-68.
- Sperl, C. (1999). Erfassung der raum-zeitlichen variation des Bodenwassergehaltes in einem agrarökosystem mit dem Ground-penetrating Radar, PhD Thesis Technische Universität München, München, 182 pp.
- Starr, J.L., Parkin, T.B., Meisinger, J.J. (1995). Influence of sample size on chemical and physical soil measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:713-719.
- Steffen, Robertson and Kirsten (B.C.) Inc. (SRK). (1989). Draft acid rock drainage technical guide, Volume I. Report prepared for British Columbia Acid Mine Drainage Task Force. Bi-Tech Publishers Ltd., Vancouver, B.C.
- Suarez Diaz, J. (2004). Características de la vegetación para obras de bioingeniería. II simposio Latinoamericano de Control de erosión. Lima Perú.
- Suarez Diaz, J. (2004). Control de la erosión en zonas tropicales. Ediciones Universidad Industrial de Santander. 555p
- Sverdrup, H. (1990). The kinetics of base cation release due to chemical weathering. Lund University Press, Lund.
- Swanson, D. A, Barbour, S. L., Wilson, G. W., O’Kane, M. (2003). Soil–atmosphere modeling of an engineered soil cover for acid generating mine waste in a humid, alpine climate. *Can. Geotech. J.* 40, 276–292.
- Swanson, D.A., Barbour, S.L., Wilson, G.W., O’Kane, M.A. (2003). Soil-atmosphere modeling of an engineered soil cover for acid generating mine waste in a humid, alpine climate. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 276-292.
- Talineau, J.C., et Lespinat, P.A. (1971). Évolution des profils hydriques relevés par la méthode neutronique sous quelques plantes fourragères en saison sèches. *Cah. ORSTOM, Sér. Biol.*, n°15, 1-19.
- Tanner, C.B., Abrams, E., Zubriski, J.C. (1948). Gypsum moisture-block calibration based on electrical conductivity in distilled water. *Soil Sci., Soc. Am. Proc.* 13, 62-65.
- Tansey, K.J., Millington, A.C., Battikhi, A.M., White, K.H. (1999). Monitoring soil moisture dynamics using satellite imaging radar in northeastern Jordan. *Applied Geography*, vol. 19, pp. 325-344.

Referencias

- Tassé, N., Germain, D., Dufour, C., Tremblay, R. (1997). Organic-waste cover over the East Sullivan mine tailings : Beyond the oxygen barrier. *In* Proceedings of the 4th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Vancouver, B.C., 31 May – 6 June, Vol. 4, 1627-1642.
- Taylor, G., Spain, A., Nefiodovas, A., Timms, G., Kuznetsov, V., Bennett, J. (2003b). Determination of the reason for deterioration of the Rum Jungle Waste Cover. Report of Australian Center For Mining Environmental Research. (http://www.inap.com.au/public_downloads/Research_Projects/Rum_Jungle_Report.pdf; Verified on February 2006).
- Taylor, G., Spain, A., Timms, G., Kuznetsov, V., Bennett, J. (2003a). The medium-Term Performance on waste rock covers-Rum Jungle as case study. Proceeding of the 6th ICARD, Cairn, QLD, 12-18 July 2003, 383-397.
- Thomson, S. J. and Armstrong, C. F. (1987). Calibration of the Watermark Model 200 Soil Moisture Sensor. *Applied Engineering in Agriculture* 3(2):186-189.
- Tibble, P. A., and Nicholson, R. V. (1997). Oxygen consumption on sulphide tailings and covers: measured rates and applications. *Proc. 4th International Conference on Acid Rock Drainage*, Vancouver, BC (2), 647-661.
- Timms, G.W., and Bennet, J.W. (2002). The effectiveness of cover at Rum Jungle after fifteen years, in *Proceeding Fifth International Conference on Acid Rock Drainage*, 813-818 (Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. Littleton).
- Tony, J. L. (1970). Étude expérimentale des phénomènes d'hystérésis dans les écoulements en milieux poreux non saturés. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, université de Grenoble, 140 pp.
- Topp, G. C. and Ferré, T.P.A. (2002). Water content, In, *Methods of Soil Analysis. Part 4.* (Ed. J.H. Dane and G.C. Topp), SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison WI.
- Topp, G.C., Davis, J. L., Annan, A. P. (1982). Electromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Application to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Am. J.*, Vol. 46, pp. 672-677.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, 574-582.
- Tratch, D., Fredlund, D., and Wilson, G. (1995). An Introduction to Analytical Modeling of Plant Transpiration for Geotechnical Engineers, *Proc. 48th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, BC, 2, 771-780.

Referencias

- Tremblay, R. (1994). Controlling acid mine drainage using an organic cover : the case of the East Sullivan mine, Abitibi, Québec. *In* Proceedings of the International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and 3rd International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Pittsburgh, 24-29 April, United States Department Interior, Bureau of Mines, Special Publication SP 06A-94, Vol. 2, 122-127.
- Trépanier, S., B. Bussière, F. Tremblay, M. Aubertin et J. Cyr. (2006). Characterization and evolution of vegetation established on a multilayer cover aiming at controlling the production of acid mine drainage. CLRA 2006 Conference, Ottawa, Ontario, August 20-23, 2006 (to be published).
- Troeh, F.R., Jabro, J.D., and Kirkham, D. (1982). Gaseous diffusion equations for porous materials. *Geoderma*, **27**: 239-253.
- Ullom, W. L. (1995). Soil gas sampling. *In Handbook of vadose zone characterization and monitoring*, eds.L.G. Wilson, L.G. Everett, S.J. Cullen, pp.555-67. Lewis Publishers.
- Unsaturated Soils Group (1997). SoilCover user's manual, version 4.0. Unsaturated Soils Group, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Vachaud, G. (1968). Contribution à l'étude des problèmes d'écoulement en milieux poreux non saturés. Thèse de Doctorat ès-Sciences physiques, université de Grenoble.
- Valdivia, H. (2000). Ingeniero Agrícola, profesor Principal de la Universidad de Ingeniería Agrícola de la UNALM. Entrevista personal.
- van Bavel, C. H. M., Underwood. N., Swanson, R. W., (1956). Soil moisture measurement by neutron moderation. *Soil Science*, 82, 29-41.
- van Bavel, C.H.M. (1961). Lysimeter measurements of evapotranspiration in the Eastern United States. *Soil Sci. Soc. Proc.* 25, 138-141.
- van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-898.
- van Overmeeren, R. A., Sariowan, S.V., Gehrels, J. C. (1997). Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content; results of comparative measurements at two test sites. *Journal of hydrology*, 97, 316-338.

Referencias

- Velarde, L. (1996). Experiencias relativas en la Estabilización de Presas de Relaves. En Revista Minería, No 242. Año XLIII. Julio – Agosto. Lima – Perú.
- Vicente, M. A., Gallardo, J.F., Moreno, G., González, M. I. (2003). Comparison of soil water-contents as measured with a neutron probe and time domain reflectometry in a Mediterranean forest (Sierra de Gata, central Western Spain). *Ann. For. Sci.*, 60, 185-193.
- Vigneault, B., Campbell, P.G.C., Tessier, A., and De Vitre, R. (2001). Geochemical changes in sulphidic mine tailings stored under a shallow water cover. *Water Research*, 35(4): 1066-1076.
- Wack, B. (1969). Mesures par radioactivité en mécanique des sols. Thèse de Doctorat ès-Sciences Physiques. Faculté des Sciences, Université de Grenoble.
- Walker, J.P., Willgoose, G.R., Kalma, J.D. (2004). In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology*, vol. 293, pp. 85-99.
- Weeks, B., and Wilson, G. W. (2005). Variations in moisture content for soil cover over a 10 year period. *Can. Geotech. J.*, 42, 1615-1630.
- Weiler, K.W., Steenhuis, T.S., Boll, J., Kung, K.-J.S. (1998). Comparison of ground penetrating radar and time-domain reflectometry sensors. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 62, pp. 1237-1239.
- Weitz, A.M., Grauel, W.T., Keller, M., Veldkamp, E. (1997). Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin, *Water*
- White, I. et Zegelin, S.J. (1995). Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content. Dans *Vadose zone characterization and monitoring*. L.G. Wilson, L.G. Everett, S.J. Cullen (eds) CRC Press, pp. 343-385.
- Wijaya, K., Nishimura, T., Makoto, K. (2002). Estimation of bulk density of soil by using amplitude domain reflectometry (ADR) probe. *Proceeding of World Congress of Soil Science (WCSS)*, August, 14-21, 2002, Bangkok, Thailand, Paper n°. 385, pp 1-11.
- Williams, D. J., Currey, N. A., Ritchie, P., Wilson, G.W. (2003). Kidston waste rock dump design and store and release cover performance seven year on. *Proceeding of the 6th ICARD*, Cairn, QLD, 12-18 July 2003, 419-426.
- Williams, D.J., Wilson, G.W., and Currey, N.A. (1997). A cover system for a potentially acid forming waste rock dump in a dry climate. *In Proceeding of Proceedings of*

Referencias

- the 4th International Conference on Tailings and Mine Waste '97, Fort Collins, Colo., 13-17 January, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 231-235.
- Wilson, G.W., Fredlund, D.G., and Barbour, S.L. (1994). Coupled Soil-Atmosphere Modeling for Soil Evaporation. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol: 31, pp. 151-161.
- Wilson, G.W., Newman, L., Barbour, S.L., O'Kane, M., and Swanson, D.A., (1997). The cover research program at Equity Silver Mine Ltd. Forth International Conference on Acid Rock Drainage, May 31 – June 6, 1997, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Wilson, G.W., Williams, D.J., and Rykaart, E.M. (2003). The integrity of cover systems: an update. *In Proceedings of 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD): Application and Sustainability of Technologies*, Cairns, Australia, July 14-17, T. Farrell and G. Taylor (Eds), Australian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), Carlton South, Australia, 445-451
- Wilson, L.G., Dorrance, D.W., Bond, W.R., Everett, L.G., Cullen, S.J. (1995). In situ pore-liquid sampling in the vadose zone. *Dans Vadose zone characterization and monitoring*. L.G. Wilson, L.G. Everett, S.J. Cullen (eds) CRC Press, pp. 477-521.
- Wojdak, P.J., and Sinclair, A.J. (1984). Equity Silver Silver-Copper-Gold Deposit: Alteration and Fluid Inclusion Studies, *Econ. Geol.* Vol 79, 969-990.
- Wraith, J.M., and Or, D. (1999) Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. *Water Resources Research* 35, 361-369.
- Wyman, J. (1930) Measurements of the dielectric constants of conducting media. *Physical Review*, 35, 623-634
- Wyns, R., Baltassat, J.M., Lachassagne, P., Legchenko, A.V., Vairon, J., Mathieu, F. (2004). Application of magnetic resonance sounding to groundwater reserves mapping in weathered basements rocks (Brittany, France), *Bulletin de la société Géologique de France*, t. 175, vol., 1, 21-34.
- Yanful, E.K. (1993). Oxygen diffusion through soil covers on sulphidic mine tailings. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **119** (8): 1207-1228.
- Yanful, E.K., Simms, P.H., and Payant, S.C. (1999). Soil covers for controlling acid generation in mine tailings: a laboratory evaluation of the physics and the geochemistry. *Water, Air and Soil Pollution*, 114: 347–375.

- Yu, C., Warrick, A. W., Conclin, M. H. (1999). Derived functions of time domain reflectometry for soil moisture measurement. *Water Resources Research*, Vol. 35, 1789-1796.
- Zeglin, S.J., White, I., Russell, G.F. (1992). A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content. *SSSA. Spec. Publi., Soil Sci., Soc. Am.*, 30, 187-207.
- Zerhouni, M. I. (1995). Triaxial testing using psychrometers (In French). p. 673–678. *In* E.E. Alonso and P. Delage (ed.) *Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 95)*, Paris. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Zhan, G., Aubertin, M. Mayer, A., Burke, K. and McMullen, J. (2001). Capillary cover design for leach pad closure, *SME Transaction* 2001, 1: 104-110.
- Zhan, G., Aubertin, M. Mayer, A., Burke, K. and McMullen, J. (2001). Capillary cover design for leach pad closure, *SME Transaction* 2001, 1, 104-110.
- Zhan, G., Mayer, A.B., McMullen, J., and Aubertin, M., (2000). Capillary cover design for a spent leach pad. *Proceedings of the International Symposium on Hydrology and the Environment*, Wuhan, Hubei, P.R.China
- Zhan, G., Schafer, W., Milczarek, M., Myers, K., Giraudo, J., Espell, R. (2006). The evolution of evapotranspiration cover systems at Barrick Goldstrike Mines. *Proceeding of the 7th ICARD*, Saint Louis MO, Published by ASMR, KY.
- Zhou, Q. Y., Shimada, J., Sato, A. (2001). Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.*, 37, 273-285.