

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HIDRICO

ESTUDIO PRÁCTICO, TEORICO Y NUMERICO ACERCA DE LA ATENUACIÓN
NATURAL EN SUELOS NATURALES

WALTER RENE WILMANS CIFUENTES

2005



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

ESTUDIO PRÁCTICO, TEORICO Y NUMERICO ACERCA DE LA ATENUACIÓN
NATURAL EN SUELOS NATURALES

WALTER RENE WILMANS CIFUENTES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN EVALUADORA

Sr. Carlos Espinoza	Profesor Guía
Sra. María Pía Mena	Profesor de Comisión
Sr. Alejandro Grilli D-F	Profesor de Comisión

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HIDRICO

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2005

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO.

POR : WALTER WILMANS CIFUENTES

FECHA : 18 ENERO 2005

PROF. GUÍA : SR. CARLOS ESPINOZA

ESTUDIO PRÁCTICO, TEORICO Y NUMERICO ACERCA DE LA ATENUACION NATURAL EN SUELOS NATURALES

Los rellenos sanitarios son el método de disposición final de residuos sólidos más utilizado en la actualidad en Chile. Por tal razón el presente estudio pretende generar información y metodologías para abordar los efectos de éstos sobre el medio ambiente y en especial sobre los recursos hídricos subterráneos.

El trabajo se enfocó en la migración y atenuación de lixiviados en el suelo, con énfasis en la componente hidráulica. El esquema desarrollado se dividió en una fase experimental y otra numérica. La fase experimental estuvo compuesta por el diseño, construcción y operación de 16 columnas de suelo, con ocho diferentes tipos de suelos naturales. Dichas columnas fueron construidas reproduciendo las condiciones de terreno de un relleno sanitario, es decir: carga de percolado, capa de arcilla y suelo natural. Por otro lado, todos los suelos fueron completamente caracterizados desde un punto de vista hidráulico, físico, químico y bacteriológico. Estos datos en conjunto con un modelo conceptual, fueron utilizados para la calibración y validación de un modelo numérico de flujo en la zona no saturada. Con los parámetros ya calibrados, se realizó una proyección del flujo de lixiviados.

Las principales conclusiones desde el punto de vista hidráulico fueron dos. La primera, correspondió a la elaboración de un modelo conceptual que integró el flujo de lixiviados generados en rellenos sanitarios y una serie de evaporaciones no controladas en la instalación experimental. La segunda, esta relacionada con la clara tendencia a la colmatación del medio poroso, por el paso de los lixiviados, en la mayoría de los suelos estudiados, lo cual quedó de manifiesto al observar que las tasas de infiltración promedio en el tiempo, disminuían con una clara tendencia exponencial.

También, en base a información experimental y de literatura, se pudo constatar la descomposición de las arcillas por efecto del contacto con el lixiviado. Por tal razón, se debería siempre utilizar dichos elementos en conjunto con materiales sintéticos, que permitan generar una carpeta lo más estanca posible.

Otros análisis permitieron generar una serie de perfiles de concentración de para compuestos presentes en la fracción soluble del suelo. Se pudo observar que algunos perfiles de DBO₅ y DQO de ciertas columnas, presentaban la existencia de una zona, donde probablemente se encontrarían microorganismos adaptados a condiciones anaeróbicas, que estarían degradando la materia orgánica de la fracción soluble del suelo. Esta zona se denominó Zona de Actividad Microbiana. Debido a que las hipótesis planteadas no son del todo concluyentes, será necesario proyectar nuevas investigaciones en el campo de la atenuación química y toxicológica por el paso de lixiviados.

Finalmente hay que señalar que los procesos de atenuación natural y en particular los hidráulicos se desarrollan en gran parte de los suelos estudiados, y dicha capacidad esta directamente relacionada con el tiempo y volumen de líquido percolado pasante, características físicas y químicas, tanto como del líquido percolado y del suelo inmediatamente bajo él.

**“Todos los ríos van al mar y
el mar jamás se llena”**

Ec 1,7

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar dando gracias a Dios por haberme brindado la oportunidad de proseguir los estudios, por la salud y la energía para seguir por este camino. En segundo lugar a mi familia (Walter, Graciela, Ursula, Sally, Gracy) que me acogió en este tiempo adicional de especialización, brindándome su apoyo y compañía.

Un especial agradecimiento al profesor Carlos Espinoza, por brindarme: su apoyo en los momentos cuando la moral se encontraba baja, conocimiento para enfocar los problemas, paciencia para escuchar mis puntos de vista y esencialmente amistad a lo largo de todo este proceso de aproximadamente tres años. Muchas gracias.

También agradecer en forma especial a la Profesora Gabriela Castillo, quien puso a mi disposición su laboratorio y buena su voluntad. A María Pía Mena, por sus certeros comentarios y apoyos en el desarrollo de la tesis. Por otro lado, dar las gracias a Manuel Cáceres (Che Manuel), Juan Donoso, Viviana Lorca, Andrés Ramos (Master) y Patricio Carrasco por colaborar y brindarme todo el apoyo necesario tanto en el desarrollo de la tesis, como en la parte humana.

A Jorge Ramírez y Paola Basaure, darles las gracias por su sincera amistad y compañía en tantos momentos felices e infelices durante mi estadía en los años de universidad. A Julio Cornejo (Conejo), por brindarme su compañerismo, buen humor y gratos momentos de profunda filosofía.

Agradecer a mis compañeros: Carola Olivares, Héctor Maulen (Tito), Santiago Montserrat (Chago), Patricio Valck, Carola Meruane, Alberto de la Fuente, Iñigo Otondo, Julio Aguirre, Lorena Fernandez, Carlos Mella, José Delgado (Pepeee), Ricardo Gonzalez, Solange, Gonzalo Lobos (Globos), Alexander Von Frei, Rodrigo Saraiva (Flaco), Rodrigo Muñoz (Rorro), Susana, Leslie, Rodrigo (Chechember), Sebastián, Werhner, Cristian, Sergio, Pablo (Palagos), Martín, Diego y tantos otros que se me quedan en el tintero. En forma especial a profesor Daniel Rodríguez, por su forma tan interesante de mirar el mundo.

Quisiera darme un gusto y nombrar algunas “*cosas de la vida*” que aprendí, viví y madure durante el transcurso de este último tiempo:

- En la vida para alcanzar metas altas (espirituales, físicas, económicas, amorosas) hay que ser disciplinado, ordenado, constante y tener claros los objetivos y hacia donde quiero apuntar.
- Todos los trabajos y planes que uno se proponga llegan a su final, por muy difíciles que se vean.
- Los sueños hay que cumplirlos, con fe y esperanza.
- Si te caes, te puedes parar y seguir adelante.
- Todos somos iguales ante Dios: los ricos, los pobres, los inteligentes y los tontos.

Finalmente, Mi Padre me dijo cuando era pequeño: “*Especialízate en lo que tú hagas en tu vida. Si eres maestro martillador de clavos, se el mejor de todos*”. Bueno Papá, creo que di un pequeño paso hacia eso que siempre me inculcaste, pero todavía me queda mucho por recorrer.

Los autores desean agradecer el financiamiento de esta investigación a través del proyecto Fondecyt 1010526. Asimismo, los autores desean agradecer el apoyo de la empresa HIDROLAB Laboratorios de Agua en todo lo que respecta a las actividades experimentales de este proyecto.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	5
1.1. INTRODUCCIÓN	5
1.2. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	6
2. ANTECEDENTES GENERALES	8
2.1. INTRODUCCIÓN	8
2.2. FORMACIÓN DEL SUELO	8
2.2.1. PERFIL DE SUELO	10
2.2.2. FASES DEL SUELO	10
2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS	11
2.3.1. POROSIDAD	12
2.3.2. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO	12
2.3.3. CAPILARIDAD EN MEDIOS POROSOS	13
2.3.4. PERMEABILIDAD SATURADA	13
2.4. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICA DE LOS SUELOS	14
2.5. PROPIEDADES BIOLÓGICAS DE LOS SUELOS	15
2.6. ECUACIONES DE FLUJO Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES ZONA NO-SATURADA	15
2.6.1. ECUACIONES DE FLUJO	16
2.6.2. CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA, $\theta(h)$	20
2.6.3. CURVA DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN INTERNA, $K(h)$.	21
2.6.4. ECUACIONES DE TRANSPORTE Y DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES	22
2.6.5. ECUACIÓN DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES	26
2.6.6. PROCESOS DE ATENUACIÓN	27
2.7. PROCESOS DE ATENUACIÓN NATURAL	28
2.8. COMPORTAMIENTO DE METALES EN EL SUELO	30
2.8.1. LOS METALES EN EL SUELO	31
2.8.2. FORMACIÓN EN LA FASE SÓLIDA	32
2.8.3. REACCIONES EN LA SUPERFICIE	32
2.8.4. PROPIEDADES DEL SUELO QUE AFECTAN LA ADSORCIÓN	33
2.9. COLMATACIÓN EN MEDIOS POROSOS	34
3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA EVALUAR LA ATENUACIÓN NATURAL EN SUELOS	38
3.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	38
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS COLUMNAS	39
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS	41
3.3.1. HUMEDAD INICIAL	42
3.3.2. PERMEABILIDAD SATURADA	42
3.3.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS	43
3.3.4. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNIC (CIC)	44
3.3.5. CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA	45
3.3.6. ECOTOXICIDAD Y RECuento DE BACTERIAS	46
3.4. EXPERIENCIAS REALIZADAS Y CONTROL	47

3.4.1.	SEGUIMIENTO SEMANAL DE LAS COLUMNAS	48
3.4.2.	DENSIDAD DEL LÍQUIDO LIXIVIADO	51
3.5.	CARACTERIZACIÓN DE LOS LIXIVIADOS ENTRANTES	51
3.6.	CARACTERIZACIÓN COLUMNA S₃A Y S₃B ENTRANTE Y SALIENTE	54
3.7.	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	57
4.	ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE ATENUACIÓN NATURAL	58
<hr/>		
4.1.	OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE ROTURA DE LAS COLUMNAS	58
4.2.	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS Y ANÁLISIS	59
4.3.	RESULTADOS OBTENIDOS	60
4.6.1	COMPONENTE HIDRÁULICA	60
4.6.2	COMPONENTES DE CALIDAD FÍSICO, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA	63
4.6.3	COMPONENTE BACTERIOLÓGICA Y TOXICOLÓGICA	66
4.4.	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	66
5.	MODELOS DE FLUJO EN COLUMNAS DE EXPERIMENTACIÓN	68
<hr/>		
5.1.	INTRODUCCIÓN	68
5.2.	MODELO CONCEPTUAL DEL PROBLEMA DE FLUJO	68
5.3.	PROCESO DE EVAPORACIÓN	71
5.4.	AJUSTE DE PARÁMETROS DE CURVAS DE RETENCIÓN	73
5.4.1.	PROCESO DE AJUSTE	73
5.4.2.	DATOS AJUSTADOS	75
5.5.	ANTECEDENTES GENERALES PROCESO DE CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y PROYECCIÓN	83
5.5.1.	DISCRETIZACIONES ESPACIALES Y TEMPORALES	84
5.5.2.	CONDICIONES INICIALES	85
5.5.3.	TIEMPOS CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y PROYECCIÓN	85
5.6.	PROCESO DE CALIBRACIÓN	86
5.6.1.	CRITERIOS GENERALES UTILIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN	87
5.6.2.	CALIBRACIÓN COLUMNA S ₃ A Y S ₃ B	87
5.6.3.	COMENTARIOS GENERALES	91
5.7.	VALIDACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS	93
5.7.1.	COLUMNA S ₁ A	93
5.7.2.	COLUMNA S ₂ A	94
5.7.3.	COLUMNA S ₃ A	95
5.7.4.	COLUMNA S ₅ B	96
5.7.5.	COLUMNA S ₆ B	97
5.7.6.	COLUMNA S ₇ B	97
5.7.7.	COLUMNA S ₈ B	98
5.7.8.	COMENTARIOS	99
5.8.	ESTIMACIÓN DE FRENTE DE HUMEDAD	100
5.8.1.	PROYECCIÓN COLUMNA S ₇ B	100
5.9.	TIEMPOS DE SALIDA DE LAS COLUMNAS	102
5.10.	COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	103

6. COLMATACION Y DESCOMPOSICION DEL ESTRATO DE ARCILLA EN LAS COLUMNAS	104
<hr/>	
6.1. INTRODUCCIÓN	104
6.2. TASAS DE INFILTRACIÓN	104
6.3. ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE COLMATACIÓN	109
6.4. DEGRADACIÓN DE LAS ARCILLAS	110
6.5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	111
7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	112
<hr/>	
7.1. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES HIDRÁULICAS	112
7.2. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES DE COMPONENTE CALIDAD	113
7.3. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES DE TOXICOLÓGICA	114
7.4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES	114
BIBLIOGRAFÍA	116
<hr/>	

ANEXOS

ANEXO 1: MODELOS DE CURVA DE SUCCIÓN.

ANEXO 2: MONITOREO DE LA ZONA NO SATURADA, MANIPULACIÓN DE MUESTRAS Y TEST DE LIXIVIACIÓN.

ANEXO 3: ALBÚM DE FOTOS.

ANEXO 4: PERFILES DE CARGA DE CONTAMINANTES.

ANEXO 5: PERFILES DE BACTERIAS Y TOXICOLÓGICOS.

ANEXO 6: DESCRIPCIÓN DE MODELO HYDRUS 1D.

ANEXO 7: CALIBRACIÓN MODELO DE FLUJO.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

Los rellenos sanitarios son el método de disposición final de residuos sólidos más utilizado en la actualidad en Chile y Latinoamérica, por tal razón se vuelve imperativo estudiar los efectos de éstos sobre el medio ambiente y en especial sobre el recurso hídrico subterráneo.

Los lixiviados son un subproducto de la descomposición de la basura y de los efectos del clima del lugar de emplazamiento del relleno. Estos poseen altas concentraciones de materia orgánica e inorgánica, sólidos suspendidos y disueltos que hacen del líquido lixiviado una sustancia tóxica o potencialmente tóxica, que en pequeñas cantidades pueden afectar grandes volúmenes de agua. Además es frecuente encontrar microorganismos y virus.

En la actualidad, el potencial de infiltración de lixiviados o percolados se controla mediante de la impermeabilización del fondo del relleno sanitario utilizando sellos de arcilla, materiales geosintéticos altamente impermeables, y la mayoría de las veces, mediante una combinación de ambas soluciones. Cada una de estas alternativas de impermeabilización tiene asociado un costo bastante elevado, no solo de adquisición y mantención, sino que de ambas, sumados a esto, los materiales deben ser instalados por personal muy capacitado y cumpliendo una serie de normas y certificaciones para su correcto uso. Además de la impermeabilización se debe agregar las distintas protecciones pasivas como lo son la recirculación del líquido lixiviado y las plantas de tratamiento, que permiten mejorar las condiciones de calidad de este líquido y cumplir con las normativas ambientales vigentes para su descarga.

En muchas situaciones reales el costo de la protección ambiental que permite cada una de estas soluciones puede ser un porcentaje muy alto del costo total del proyecto, con lo cual éste se encarece más allá de las posibilidades de pequeñas ciudades (menores a 20.000 habitantes (EPA)). Debido a lo anterior muchas localidades ven impedidas sus posibilidades de utilizar este método de disposición de residuos sólidos, por lo que mantienen vertederos o basureros que no cumplen con estándares mínimos de diseño.

Existe un gran número de rellenos sanitarios que posee una fuente infraestructura de elementos impermeabilizantes sintéticos que permiten una carpeta estanca, pero que pueden ser fácilmente deteriorada por esfuerzos puntuales producidos por elementos corto punzantes contenidos en los residuos. Estos originan roturas longitudinales o perforaciones en las láminas alterando su capacidad de estanqueidad (Alegría, X. 1992). Dicho efecto producirá una fuga no deseada de lixiviados, que primeramente viajarán por la zona no saturada, para luego llegar a la zona saturada y contaminar las aguas.

La atenuación natural como una forma de tratamiento o manejo de los lixiviados ha sido utilizada en diferentes partes del mundo, tal como se presenta en el trabajo de Sophocleous (1996). La capacidad de autopurificación o atenuación natural de un suelo, corresponde al potencial de reducción de la concentración de los contaminantes presentes en el líquido lixiviado, debido a una serie de procesos que ocurren en el suelo y que engloban una conjunto de reacciones químicas, físicas y biológicas. Estos procesos ocurren en la zona saturada y no

saturada del suelo, y están representados por intercambio iónico, sorción, volatilización de compuestos orgánicos, actividad microbiana y filtración mecánica.

En los últimos años han aparecido evidencias que indican que el proceso de atenuación natural o autopurificación de suelos puede jugar un rol muy importante en la protección ambiental de rellenos sanitarios, lo que permitiría dejar de lado las protecciones o impermeabilizaciones de fondo y permitir que el suelo en forma natural degrade o absorba los elementos químicos y biológicos presentes en el líquido lixiviado (Bishop, 1996; Christensen et al, 1996). Estudios a nivel nacional (Alegría et al, 1990), demuestran que procesos de intercambio catiónico, procesos biológicos y de colmatación en sellos de arcillas, sometidas a cargas de líquido lixiviado, permiten la atenuación o defensa del acuífero, frente a contaminaciones en la zona no saturada.

1.2. Objetivos Generales y Específicos

El presente estudio pretende generar información técnica para abordar, de manera objetiva, futuros estudios de impacto ambiental y diagnósticos del funcionamiento de sistemas de disposición de residuos sólidos frente a episodios como los antes expuestos.

Para lograr el objetivo específico se plantearon los siguientes objetivos específicos, que fueron abordados durante el desarrollo de la tesis.

- Realizar una exhaustiva revisión bibliográfica acerca de la zona no saturada, que involucre temas como: propiedades físicas, químicas, bacteriológicas y toxicológicas de los suelos, principales ecuaciones de flujo y transporte de contaminantes, principales reacciones químicas, físicas y bacteriológicas, así como experiencias nacionales e internacionales en flujos a través de arcillas y zonas no saturadas.
- Generar una instalación experimental que permita reproducir el comportamiento de un relleno sanitario frente a un episodio de migración de contaminantes a través de una capa de arcilla y estudiar el flujo que se produce en la zona no saturada inmediatamente debajo de la capa de arcilla.
- Modelar la migración de lixiviados en la zona no saturada del suelo, utilizando un esquema unidimensional, que nos permitan reproducir el comportamiento de las columnas de suelo.
- Calibrar las principales variables de flujo de lixiviados en la zona no saturada, utilizando un software especializado que soluciona las ecuaciones de flujo y transporte.
- Estudiar el comportamiento físico de las arcillas frente a la presencia de lixiviados.
- Realizar experiencias que permitan comprobar la existencia de atenuación natural en la zona no saturada, ya sea física o química.

Este documento presenta la información derivada del estudio de aproximadamente tres años acerca de la atenuación natural, los cuales se sintetizaron en seis capítulos que se detallan a continuación.

En el *Capítulo 2* se incluye una completa revisión bibliográfica acerca de los procesos de formación, caracterización de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. Además, se plantean las principales ecuaciones de flujo y transporte en la zona no saturada del suelo, se incluye además aspectos de monitoreo y manipulación de muestras y se describen los principales procesos de atenuación naturales de contaminantes en el suelo.

En el *Capítulo 3* se describe la instalación experimental que sirve como base para el siguiente capítulo, que aborda el problema de flujo de lixiviados en la zona no saturada del suelo.

En el *Capítulo 4* se presentan los resultados obtenidos al analizar algunas de las columnas experimentales. A dichas columnas se le realizaron test de lixiviación, que tienen por finalidad obtener la fracción soluble de los contaminantes presentes en el suelo. También se realizaron, perfiles de conductividad hidráulica y toxicidad.

En el *Capítulo 5* se desarrolla la calibración, validación y proyección de las principales variables hidráulicas del flujo de lixiviados en la zona no saturada. Dentro de los principales tópicos abordados se presenta: realización de modelo conceptual del modelo de flujo, caracterización del proceso de evaporación no controlado de la instalación experimental, ajustes de las curvas de succión y calibración, validación y proyección de los frentes de humedad y volúmenes salientes de las columnas experimentales.

El *Capítulo 6* tiene por objetivo describir y analizar la colmatación del medio poroso por el efecto del paso de lixiviados y a su vez realizar un estudio cualitativo acerca de la descomposición de las arcillas. Para el desarrollo del primer punto, se cuenta con tasas de infiltración en el tiempo, que demuestran en la mayoría de los casos, una clara tendencia a la colmatación. Dado lo anterior, se ajustó un modelo de decaimiento, pudiendo así proyectar tasas de infiltración para tiempos mayores. En el caso de la degradación de las arcillas, se cuenta con datos cualitativos del rompimiento de las columnas que indican una degradación de las arcillas, además se cuenta con artículos relacionados con el tema, que permiten obtener valiosas conclusiones.

Por último, en el *Capítulo 7* se presentan las principales conclusiones, comentarios y recomendaciones que se desprenden de la realización del presente estudio, que tienen por finalidad aportar al desarrollo de la ciencia en torno a la ingeniería ambiental y más específicamente a los procesos de flujo, transporte y atenuación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios en el suelo.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Introducción

Dentro de las ciencias que estudian el flujo y transporte en la zona no saturada, tenemos a la agronomía, hidráulica y geología. Una de las aplicaciones más directas en el campo de la hidráulica, es el estudio de recarga de acuíferos y estudios de flujo y transporte en pilas de lixiviación. En los últimos tiempos, han surgidos problemas ambientales, tales como contaminación de suelos y acuíferos, los cuales necesitan un estudio combinado de todas las áreas antes mencionadas, que permitan abordar el problema en forma integral.

Generalmente los problemas de contaminación se producen en los primeros horizontes de suelos, por lo que es necesario conocer todas las características de ellos. La ciencia que estudia el suelo se denomina edafología. A continuación presentaremos el marco conceptual de la formación de los suelos, principales características físicas, químicas y bacteriológicas. Además del marco teórico del flujo en la zona no saturada del suelo.

2.2. Formación Del Suelo

El suelo principalmente se forma por la erosión o descomposición de la roca madre, por efectos del viento, presión y microorganismos. Es así, como los cambios que sufre la roca madre se producen por la desagregación de la roca, cambios a nivel químico (reorganizaciones de los minerales), color y en su forma (textura, volumen y porosidad).

A nivel de alteración, los minerales más resistentes como los feldespatos se degradan y los más permanentes como el cuarzo se fragmenta, en esta etapa final, se generan nuevos minerales que no existen en la roca madre. Por otra parte, los microorganismos juegan un papel preponderante en llenar de materia orgánica los intersticios, como también de producir las reacciones químicas que producen la alteración de las rocas.

Jeny en 1940 determinó una ecuación general que relacionada los diferentes factores formadores para un determinado suelo:

$$S = f(CL, O, R, P, T) \quad (2.1)$$

donde:

- S : Representa el suelo.
- Cl : Representa el clima.
- O : Representa a los microorganismos.
- R : Representa el relieve.
- P : Representa a la roca madre.
- T : Representa el tiempo.

Dentro de los factores que más afectan la creación de suelo, a partir de la roca madre, tenemos:

- Composición mineralógica: a mayor número de minerales inestables, mayor tendencia a generar suelos, por efectos de la meteorización.
- Permeabilidad: controla el paso del agua y el aire, principales responsables de la fragmentación y alteración de los materiales.
- Clima: como ente que aporta agua y temperatura al suelo. La disponibilidad y disposición de agua, influyen en la rapidez del desarrollo de los suelos.
- Relieve: variables como la gravedad, capacidad de drenaje, ubicación del lugar para recibir los rayos UV, afectan el transporte y erosión de la roca madre.
- Organismos: juegan un papel fundamental en crear la materia orgánica presente en los suelos y procesar los minerales para introducirlos a los diferentes ciclos (carbono, fósforo, nitrógeno, azufre, etc)

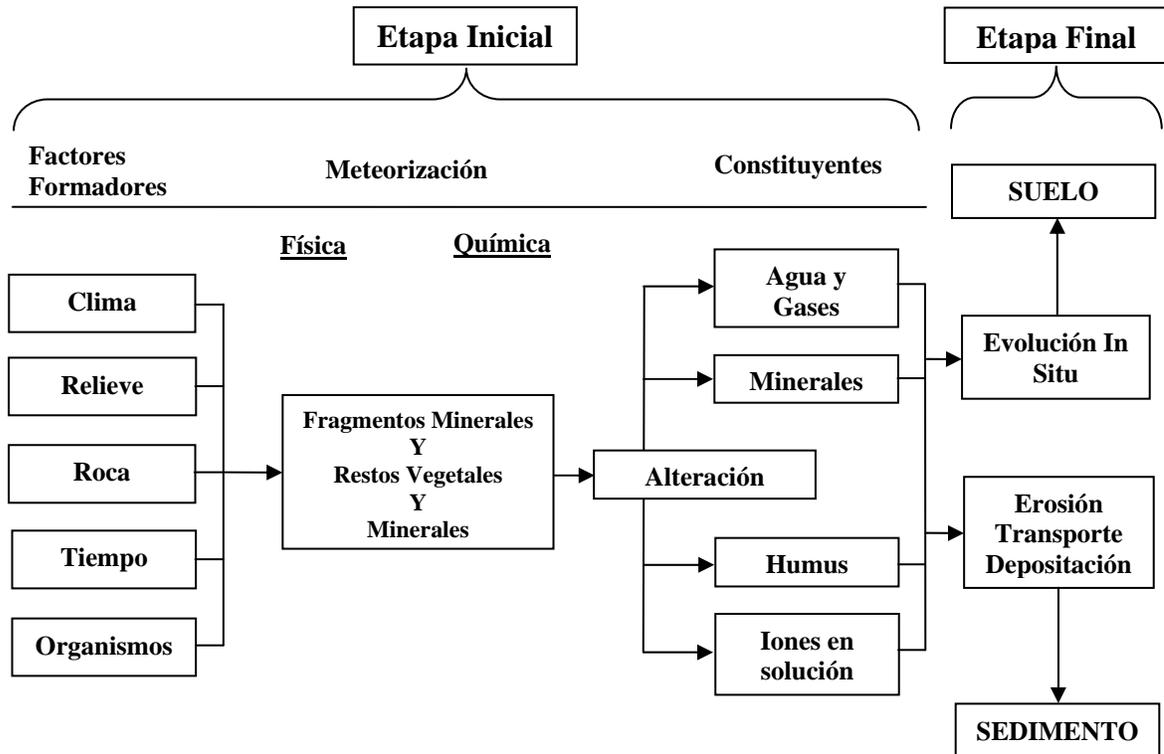
Según el tipo de suelo y el peso relativo de los puntos antes tratados, dependerá la velocidad de formación de un tipo de suelo determinado.

Además de los factores formadores de los suelos, se distinguen dos etapas: la etapa inicial y la etapa final de formación del suelo (Figura 2.1). La primera etapa se inicia con la fragmentación de la roca y la colonización por parte de los microorganismos. En la etapa final, podemos encontrar que todos los minerales formados o liberados, sufren “una serie de procesos de mezcla y diferenciaciones que si evolucionan in situ conducen a la formación del suelo, mientras que si son arrastrados a otros lugares, dan lugar a los sedimentos”.

Existe una serie de procesos que juegan un importante rol dentro de la formación del suelo, entre los que se cuentan:

- Insolación: los rayos solares calientan en forma desigual a las caras de una roca, lo que hace, junto con los cambios de temperatura naturales entre el día y la noche, que se produzcan esfuerzos diferenciales en las superficies de las rocas.
- Congelación: el agua presente en las grietas de las rocas, al congelarse, se expande produciendo fragmentación de las rocas.
- Efecto de carga y descarga: las rocas formadas bajo grandes presiones (ígneas y metamórficas) una vez que afloran, se producen relajamiento de tensiones, las que podrían producir una fragmentación de la roca.
- Dilatación y contracción.
- La traslocación, que corresponde a la mezcla y agregación de materiales, por un lado y a la separación de los mismos.
- Alteración química que sufren las rocas por acciones del aire, agua y microorganismos. Los principales procesos que se pueden apreciar son: solución de compuestos, hidratación, hidrólisis, oxidación y reducción,

Figura 2.1
Principales Procesos en la Formación de los Suelos



Fuente: Edafología Online. <http://edafologia.ugr.es/>

2.2.1. Perfil de Suelo

Un perfil es una simplificación de la tridimensionalidad que posee un cuerpo de suelo, con el fin de representarlo y analizarlo. Este corresponde a una sección vertical bidimensional de un suelo que se extiende desde la superficie hasta el material rocoso o sustrato mostrando los sustratos u horizontes que lo componen y que han sido alterados por los procesos de descomposición.

Para definir claramente un perfil de suelo, se utilizan diferentes letras O1, O2, A, B, E, C, H y R, entre otros. Cada uno de estos horizontes, representa una característica propia del suelo, por ejemplo, el horizonte H que corresponde a acumulaciones de materia orgánica sin descomponer (>20-30%), saturados en agua por largos períodos. Es el horizonte de las turbas.

2.2.2. Fases del Suelo

En el suelo conviven tres fases: sólida (50%), líquida (20%-30%) y gaseosa (20%-30%) y dependiendo del tipo de suelo es el porcentaje de las diferentes fases.

Estos componentes se encuentran interrelacionados, de manera que la organización de los componentes sólidos entre sí, determina la cantidad de espacio poroso destinado al aire y agua.

La cantidad de agua y de aire está sujeta a grandes fluctuaciones, dentro de un mismo suelo, por la influencia del clima y del manejo de éste (Honorato, 2000)

➤ **Fase Sólida**

Los principales constituyentes de la fase sólida son las especies minerales o inorgánicas y materia orgánica.

La fracción inorgánica corresponde a una mezcla de varios componentes primarios (cuarzo, feldespatos, etc) y secundarios (arcillas silicatada), variando su tamaño desde la arcilla hasta fragmentos de rocas. Determinan en relación con otros componentes, las propiedades físicas y físico química de los suelos. Además constituyen una fuente de nutrientes.

La fracción orgánica la componen sustancias orgánicas en diversos grados de descomposición, incluyendo los organismos del suelo, vivos y muertos. La fracción coloidal humificada afecta las propiedades físicas y químicas de los suelos, tales como la porosidad, retención de agua y capacidad de intercambio catiónica entre otras. Es una de las fuentes de nutrientes como nitrógeno, fósforo y sulfato.

➤ **Fase Líquida del Suelo**

Esta fase es una solución acuosa que contiene sales disueltas en pequeñas cantidades en forma de iones, variable en cantidad y tiene la capacidad de disolver diferentes solutos, en una relación dinámica entre el agua y el suelo, produciendo reacciones químicas.

➤ **Fase Gaseosa del suelo**

Corresponde a la “atmósfera” del suelo y, al igual que la atmósfera exterior, es una mezcla de gases tales como O₂, N₂, CO₂ y gases menores. El suelo posee un mayor contenido de CO₂ y en menor de N₂ y O₂ que el aire exterior, debido a la actividad biológica del suelo. La humedad relativa de esta atmósfera puede llegar al 100% ya que parte del aire se encuentra disuelto en la solución del suelo. Además, proporciona el oxígeno necesario para la vida de la mayoría de los organismos del suelo y las plantas. (Honorato, 2000)

2.3. Propiedades Físicas De Los Suelos

Existe una serie de propiedades físicas que permiten caracterizar completamente la estructura o arquitectura de los suelos. Existen propiedades primarias (textura, estructura, porosidad, peso, color y estratificación) y secundarias (drenaje y almacenamiento de agua, temperatura, capacidad de soporte, capilaridad, etc.). A continuación nos referiremos a todas aquellas propiedades que nos permitan caracterizar de mejor forma el flujo en las zonas no saturadas y comprender mejor los fenómenos que se presentarán el desarrollo de este trabajo.

2.3.1. Porosidad

Corresponde a la proporción de volumen del suelo no ocupado por sólidos, donde se puede encontrar agua y/o aire. En términos volumétricos podemos escribir la siguiente relación:

$$V_{\text{Total}} = V_{\text{Gas}} + V_{\text{Líquido}} + V_{\text{Sólido}} \quad (2.2)$$

Ahora bien, si la ecuación anterior la dividimos por el Volumen total, tenemos que:

$$n = 1 - \frac{V_{\text{Sólidos}}}{V_{\text{Total}}} = a + \theta \quad (2.3)$$

Donde n representa la porosidad del suelo en estudio, a representa el porcentaje de gas en el total de la muestra y θ representa la cantidad de agua en el suelo o cantidad volumétrica de agua el suelo.

Además, existe una clasificación funcional de los poros existentes en el suelo, que se puede observar en Tabla 2.1.

Tabla 2.1
Clasificación Funcional de los Poros en el Suelo

Tipo	Función	Diámetro Cilindro Equivalente (μm)
Poros de Transmisión	Movimiento del aire y del drenaje en exceso de agua.	> 50
Poros de Almacenamiento	Retención de agua contra gravedad.	0.5 – 50
Poros Residuales	Retención y dispersión de iones en solución.	0.005 – 0.5
Espacios de enlace	Soporta fuerzas más importantes entre las partículas de suelo.	<0.005

Fuente: Greenland, 1977.

2.3.2. Contenido de agua en el Suelo

Existen dos formas de expresar el contenido de agua presente en el suelo:

➤ **Contenido de Humedad Gravimétrico (ω)**

$$\omega = \frac{M_a}{M_s} \quad (2.4)$$

donde M_a es la masa de agua y M_s es la masa de suelo.

➤ Contenido de Humedad Volumétrica (θ)

$$\theta = \frac{V_a}{V_t} \quad (2.5)$$

donde V_a es el volumen de agua y V_t es el volumen total de suelo medido.

La relación funcional que nos permite ligar las dos formas de medir la cantidad de agua en el suelo, corresponde a la siguiente expresión:

$$\theta = \pi \cdot D_a \quad (2.6)$$

donde D_a corresponde a la densidad aparente del suelo.

2.3.3. Capilaridad en Medios Porosos

Un suelo puede suponerse como una serie de canales, cada uno capaz de actuar como un tubo de ascenso capilar. La altura de ascenso capilar, depende del tipo de suelo, diámetro de los poros y si el suelo está llenándose o vaciándose. Este efecto se puede apreciar en función del tipo de suelo en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2
Ascensos Capilares Máximos en Diferentes Terrenos y Suelos

Material	Diámetro d_{10} [mm]	Ascenso Capilar [cm]
Arcilla	0.0005	3,060
Arcilla	0.005 a 0.001	610 a 3,050
Suelo Arcilloso	-	200 a 400
Limo	-	61 a 610
Suelo Arenoso	-	100 a 150
Suelo Podsólico	-	35 a 40
Arena Fina	0.025 a 0.05	12 a 61
Arena Media	-	12 a 35
Arena Gruesa	-	12 a 15
Calizas y Areniscas Fracturadas	-	120 a 450

Fuente: E. Custodio y M.R. Llamas. Hidrología Subterránea.

2.3.4. Permeabilidad Saturada

En términos simples la permeabilidad corresponde a la resistencia que opone el suelo al paso de un líquido. Esta resistencia varía según el tipo de suelo, material que lo compone y el líquido que transita a través del suelo. En la Tabla 2.3, se puede apreciar los valores típicos de permeabilidad en función del tipo de material.

Tabla 2.3
Valores Típicos de Permeabilidad

Material	K [cm/seg]
Grava limpia	> 1
Arena Gruesa	1 a 10^{-2}
Mezcla de Arena	10^{-2} a $5 \cdot 10^{-3}$
Arena Fina	$5 \cdot 10^{-3}$ a 10^{-3}
Arena Limosa	$2 \cdot 10^{-4}$ a 10^{-4}
Limo	$5 \cdot 10^{-4}$ a 10^{-5}
Arcillas	< 10^{-6}

Fuente: E. Custodio y M.R. Llamas. Hidrología Subterránea.

2.4. Propiedades Físico Química De Los Suelos

Todas las propiedades físicas químicas de los suelos reposan en la fracción coloidal de los mismos, entre las propiedades más importantes se puede contar:

- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC):** Esta propiedad vincula la arcilla y el limo de la fracción mineral y la fracción coloidal de la materia orgánica. Está relacionada con el proceso de intercambio de cationes y aniones. En los suelos existen partículas que se pueden comportar como ácidos o como bases (generando carga positiva o negativa) y dependiendo de las características de pH del suelo, es la capacidad de retener cationes como aniones. El CIC se expresa en centimoles/kg. Los cationes más importantes son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , que son intercambiados por Al^{3+} y H^+ . Corresponde a un mecanismo reversible, llegándose siempre a un equilibrio.
- **Capacidad de Intercambio Aniónico (CIA):** suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas y dominadas por arcilla denominadas hidróxidos de Fe y Al, que tienen carga variable, pueden tener intercambio de aniones (carga positiva), las cuales aumentan a medida que disminuye el pH, que corresponde al efecto contrario de la CIC. Los principales aniones intercambiables son PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- .
- **Reacción del suelo:** se refiere al grado de acidez o basicidad del suelo y se expresa por su pH. El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones en la solución del suelo.
- **Poder Tampón o Buffer de los suelos:** corresponde a la capacidad de resistir un cambio de pH y esta relacionada con la cantidad de coloides orgánicos e inorgánicos que posee el suelo.

2.5. Propiedades Biológicas De Los Suelos

En los suelos existe una verdadera microfauna entre las que se encuentran microorganismos, animales pequeños y materia orgánica en descomposición, que participan en una serie de procesos bioquímicos.

Dentro de las componentes orgánicas del suelo encontramos las sustancias húmicas (representan la parte estabilizada de la materia orgánica) y no húmicas.

Además, se encuentran organismos que se clasifican según las labores que desempeñan y de donde obtienen sus las fuentes de energía y carbono, las cuales son:

- Autótrofos: Son los que obtienen su energía de la radiación solar y producen el carbono orgánico por fijación de CO_2 de la atmósfera durante la fotosíntesis.
- Heterótrofos: utilizan los compuestos orgánicos como fuente de energía y de carbono.
- Quimiolitótrofos: obtienen su energía a partir de reacciones químicas y fijan el carbono orgánico a partir del CO_2 . En este grupo se encuentran las bacterias Nitrosomonas y Nitrobacter, que participan del proceso de nitrificación del N amoniacal.

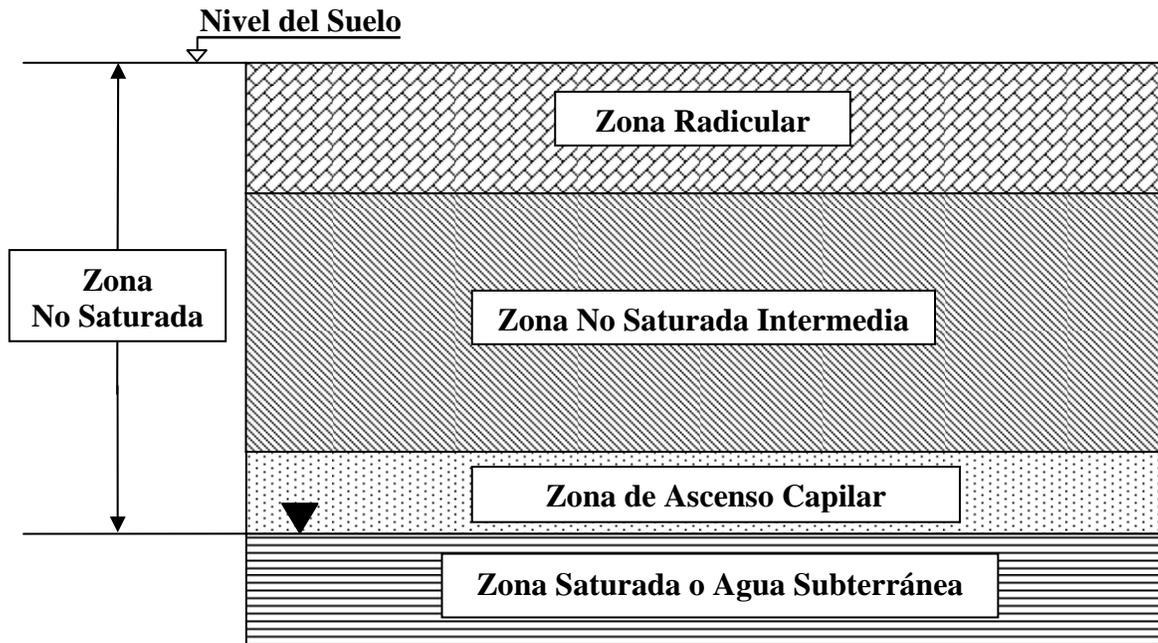
2.6. Ecuaciones de Flujo y Transporte de Contaminantes Zona No-Saturada

La contaminación antrópica de la zona saturada y no saturada tiene diversas fuentes, desde zonas puntuales o pozos (servicios de venta de bencinas, rellenos sanitarios), hasta extensas zonas que se extienden por decenas de hectáreas (contaminación por pesticidas, fertilizantes). En la práctica se suele ocupar la palabra puntual y no puntual o difusa para describir el grado de localización de la fuente contaminante.

Los contaminantes se pueden agrupar por los tipos de reacciones en las que participan. Los grupos principales son: 1) metales pesados, 2) compuestos inorgánicos, 3) hidrocarburos aromáticos, 4) hidrocarburos policíclicos aromáticos, 5) hidrocarburos clorados y 6) otros compuestos.

Tanto los procesos de flujo, transporte, degradación y atenuación de contaminantes en el suelo, ya sea en fuentes puntuales y difusas, se produce principalmente en tres zonas, dependiendo de la ubicación del foco de contaminación. La primera corresponde a la zona radicular o de raíces en el suelo, lugar donde existe una mayor cantidad de aire, bacterias e intersticios. Aquí la principal fuente de atenuación es la degradación aeróbica. La segunda corresponde a la zona no saturada del suelo y está ubicada entre la zona radicular y la zona de ascenso capilar. Por último la zona de ascenso capilar. Dentro de los principales mecanismos de degradación se tienen el anóxico e intercambio catiónico. En la Figura 2.2, se presenta un resumen esquemático de las zonas antes mencionadas.

Figura 2.2
Subdivisiones en la Zona No Saturada



Conociendo que existen tres zonas bien definidas dentro del suelo, presta vital importancia saber las ecuaciones de flujo y transporte en un medio poroso no saturado, de tal manera de representar correctamente los fenómenos que se producen en dicha zona. Cabe señalar que las ecuaciones de medios porosos son efectivas sólo en la zona radicular y la zona intermedia.

A continuación, se procederá a explicar y detallar las ecuaciones de flujo y de transporte.

2.6.1. Ecuaciones de Flujo

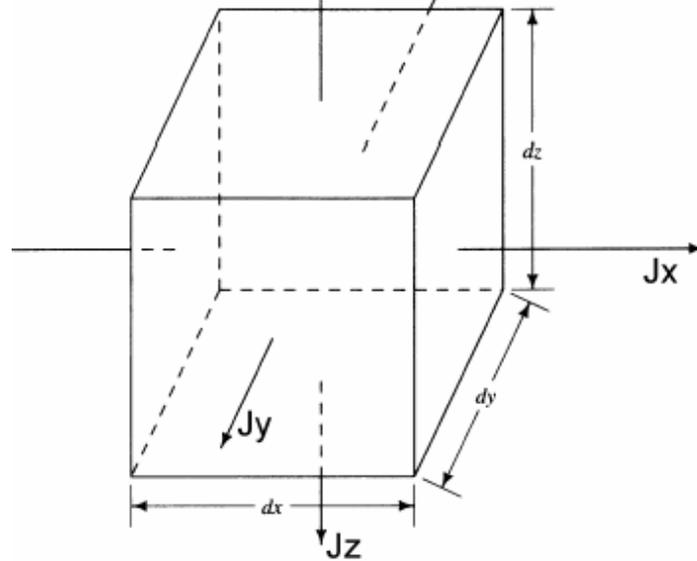
Aplicando un balance de masa a un volumen de control infinitesimal (Figura 2.3), se puede derivar la ecuación (2.7), que describe el flujo de masas en un medio poroso.

$$\frac{\partial(\rho \cdot n)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} \quad (2.7)$$

donde

- ρ : Densidad del fluido [M/L³]
- n : Porosidad del medio [L³/L³]
- v_i : Velocidad aparente en la dirección i [L/T]
- t : Tiempo [T]

Figura 2.3
Volumen de Control



En el caso de un medio poroso no saturado, la masa de fluido almacenada en el volumen de control depende del valor de la humedad presente en el medio. Luego en la ecuación (2.8) la humedad θ debe reemplazar a la porosidad n , en el término del lado derecho.

$$\frac{\partial(\rho \cdot \theta)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} \quad (2.8)$$

θ : Contenido volumétrico de agua [L^3/L^3]

Al expandir el término del lado izquierdo de la ecuación (2.8), se pueden despreciar los efectos producidos por las variaciones temporales de la densidad del fluido, debido a que en general la variación temporal del contenido de humedad es mucho mayor. Además, suponiendo que la densidad es constante dentro del volumen de control, la ecuación de flujo de masas queda de la siguiente forma:

$$\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\rho \frac{\partial(v_x)}{\partial x} - \rho \frac{\partial(v_y)}{\partial y} - \rho \frac{\partial(v_z)}{\partial z} \quad (2.9)$$

Al simplificar los términos, tenemos:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial(v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(v_z)}{\partial z} \quad (2.10)$$

En medios porosos no saturados se introduce la Ley de Flujo de Buckingham-Darcy (Ecuación 2.11), la cual es una modificación de la Ley de Darcy en la que se incorpora la dependencia funcional entre la conductividad y carga hidráulica.

$$v_i = -K_i(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial x_i} \quad i : 1,2,3 \quad (2.11)$$

donde:

- $H = h + z$: Potencial de la matriz de suelo. [L]
 h : Presión de poros (P/γ). [L]
 z : Profundidad, cota geométrica. [L]

Al introducir la ecuación (2.11) en la ecuación (2.10), se obtiene la ecuación (2.12), que es conocida como ecuación de Richards, utilizada para describir el flujo en un medio poroso no saturado.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (2.12)$$

Expandiendo el término izquierdo de la ecuación (2.12), utilizando la regla de la cadena en función de h (presión de poros), tenemos que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.13)$$

Luego, se define la capacidad de un suelo como $C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$, que corresponde a la variación de la humedad con respecto a la presión de poros. Dado lo anterior, la ecuación (2.12), se puede describir de la siguiente forma:

$$C(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(h) \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right] \quad (2.14)$$

Como el flujo es vertical, tenemos que la expresión anterior se puede desarrollar según lo que se presenta en la ecuación (2.15).

$$C(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \cdot \frac{\partial(h+z)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \cdot \frac{\partial(h+z)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(h) \cdot \frac{\partial(h+z)}{\partial z} \right] \quad (2.15)$$

Trabajando matemáticamente la expresión (2.15), se tiene:

$$C(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(h) \cdot \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \right] \quad (2.16)$$

Luego, aplicando la regla de la cadena tenemos que:

$$C(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(h) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2.17)$$

Al observar la ecuación (2.17), nos damos cuenta que la humedad θ solo depende de h o presión de poros. Por tal motivo, las derivadas parciales se pueden transformar en derivadas totales, según lo que se presenta en la ecuación (2.18).

$$C(h) \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{d}{dx} \left[K_x(h) \cdot \frac{dh}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[K_y(h) \cdot \frac{dh}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[K_z(h) \cdot \left(\frac{dh}{d\theta} \frac{d\theta}{dz} + 1 \right) \right] \quad (2.18)$$

Debido a que existe una relación funcional entre las dos variables de estado (h y θ), siendo las relaciones del tipo: $h = h(\theta)$ o $\theta = \theta(h)$, se puede escribir la permeabilidad en función de la humedad, en el caso de ausencia de histéresis en el suelo. Luego, la relación es la siguiente:

$$K_i(h(\theta)) = K_i(\theta) \quad i : 1,2,3 \quad (2.19)$$

Reemplazando (2.19) en (2.18) se obtiene:

$$C(h) \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{d}{dx} \left[K_x(\theta) \cdot \frac{dh}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[K_y(\theta) \cdot \frac{dh}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[K_z(\theta) \cdot \left(\frac{dh}{d\theta} \frac{d\theta}{dz} + 1 \right) \right] \quad (2.20)$$

Se define la difusividad del suelo-agua, de la siguiente manera:

$$D_i(\theta) = K_i(\theta) \cdot \frac{dh}{d\theta} \quad i : 1,2,3 \quad (2.21)$$

Otra de las formas de expresar la ecuación de Richards dependiendo solo de la humedad como variable de estado, es la que se presenta en la ecuación (2.22).

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dx} \left[D_x(\theta) \cdot \frac{d\theta}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[D_y(\theta) \cdot \frac{d\theta}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[D_z(\theta) \cdot \frac{d\theta}{dz} + K_z(\theta) \right] \quad (2.22)$$

En la ecuación (2.23) presenta en la llamada forma mixta, debido a que existen dos variables de estado que describen el problema, θ y h .

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dx} \left[K_x(h) \cdot \frac{dh}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[K_y(h) \cdot \frac{dh}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[K_z(h) \cdot \left[\frac{dh}{dz} + 1 \right] \right] \quad (2.23)$$

La resolución de la ecuación de Richards, requiere que se conozcan previamente las curvas de retención de agua $\theta(h)$ y la conductividad hidráulica en un medio poroso no saturado, $K(h)$ o $K(\theta)$. Existen una serie de modelos empíricos que describen el comportamiento de las curvas $\theta(h)$, $K(\theta)$ y $K(h)$, como los propuestos por Brooks and Corey (1964) y Van Genuchten (1980).

A lo largo del estudio se hablara de succión Ψ y se define de la siguiente forma:

$$\Psi = -h \quad (2.24)$$

2.6.2. Curva de retención de Agua, $\theta(h)$

Esta curva describe la capacidad del suelo de almacenar y liberar agua, y corresponde a la relación entre el contenido volumétrico de agua presente en el suelo y la succión presente en la matriz de suelo (Rawls et al. 1993). Existe una gran variedad de ecuaciones que describen la forma de curva de retención. En especial, la expresión (2.25), muestra el modelo propuesto por Van Genuchten para la curva de retención de agua.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_{\text{res}} + \frac{\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}}{\left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n\right]^m} & \text{para } h < 0 \\ \theta_{\text{sat}} & \text{para } h \geq 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

con:

- θ_{sat} : Contenido volumétrico saturado de agua, equivalente a la porosidad del suelo [L^3/L^3].
- θ_{res} : Contenido volumétrico residual de agua, corresponde a la humedad del suelo para un nivel mínimo de presión interna [L^3/L^3].
- m : $1-1/n$, donde n es un parámetro empírico
- α : Factor de escala [$1/L$].

La curva de succión puede ser generada utilizando el método de la “olla y plato de presión”. Este método se compone de una olla o cámara que, cerrada herméticamente, recibe presión de aire o un gas inerte (N) desde un compresor (Figura 2.4). De esta manera, aplicando una presión se simula la condición de succión a la cual se ve sometida el agua en el suelo. Se utilizan platos de presión, los cuales están compuestos por un plato de cerámica poroso, cuya cara inferior esta cubierta por un delgado diafragma de neopreno, con una red interna entre el plato y el diafragma que permite el flujo de agua. Un tubo interno comunica este conducto con un tubo de flujo externo que conecta la olla con la atmósfera.

Los poros del plato permiten que se forme una continuidad líquida con los poros del suelo analizado, para así poder evacuar el agua que es desplazada desde el suelo por la presión ejercida por el aire comprimido. El agua desplazada, corresponde a aquella fracción del suelo que no es capaz de retener a una presión dada. De igual forma el agua que se queda retenida por el suelo a una determinada tensión. Una vez equilibradas las muestras a una presión determinada, se secan y se determina su contenido de agua. Repitiendo este procedimiento para diferentes presiones es posible de generar la curva característica del suelo (Facultad de Agronomía Universidad de Chile, 2003).

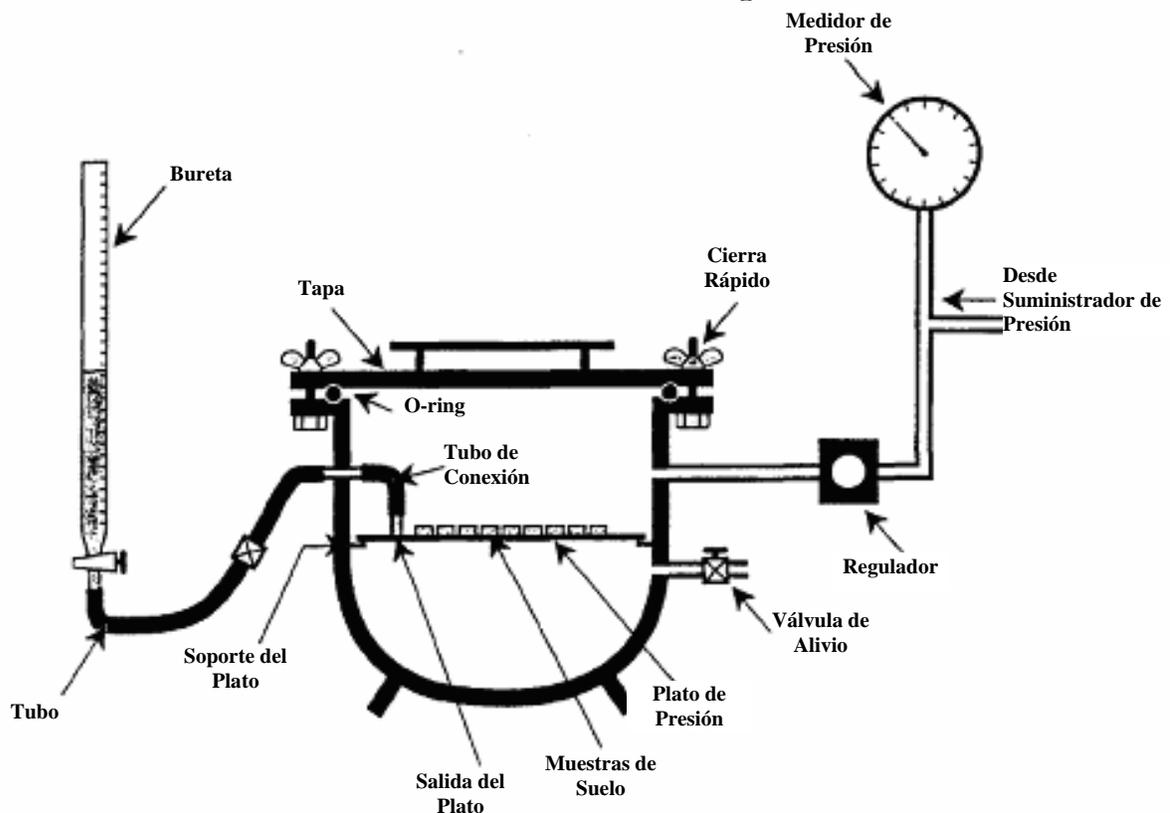
Las muestras antes de ser ubicadas dentro de la olla deben acondicionadas ser secadas al aire, luego se muelen y se tamizan a 2 mm.

El método contempla ubicar una o más muestras de suelo con tres repeticiones en la superficie del plato cerámico.

Dentro de los puntos típicos utilizados para definir la curva de succión, se tienen:

- **Saturación:** Cuando todo el espacio poroso está ocupado por el agua. La tensión es inferior a 0.3 bares y el agua esta sujeta por la fuerza de gravedad.
- **Capacidad de Campo (CC):** contenido de agua en el suelo una vez drenado libremente en el perfil, aproximadamente 24 a 48 horas después de la saturación. Sólo una parte de los poros esta llena de agua (microporos). Esta situación se asocia a una tensión en el suelo de 0.3 bares (306 cm de H₂O).
- **Punto de Marchitez Permanente (PMP):** contenido de agua en el suelo en el cual una planta es incapaz de extraer agua y se marchita sin poder recuperarse al reestablecer el contenido de humedad. El agua está retenida en delgadas películas y con mucha fuerza alrededor de las partículas de suelo, asociada a una tensión de 15 bares (15296 cm de H₂O).

Figura 2.4
Sistema Para Medir la Retención de Agua en el Suelo



2.6.3. Curva de Conductividad Hidráulica en función de la Presión Interna, $K(h)$.

La conductividad hidráulica es una medida de la capacidad del suelo para transmitir agua y depende tanto de las características del suelo como del fluido (Rawls et al., 1993). La expresión (2.26), muestra el modelo propuesto por Van Genuchten para la curva de conductividad saturada.

$$K(h) = \begin{cases} K_{\text{sat}} \frac{\left[1 - (\alpha \cdot |h|)^{(n-1)} \left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n\right]^{-m}\right]^2}{\left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n\right]^{\frac{m}{2}}} & \text{para } h < 0 \\ K_{\text{sat}} & \text{para } h \geq 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

con:

K_{sat} : Conductividad hidráulica en medio saturado (L/T).

m : $1-1/n$, donde n es un parámetro empírico.

α : Factor de escala (1/L).

Otra forma de expresar la ecuación (2.26) permite describir la conductividad hidráulica en la zona no saturada como se muestra en (2.27).

$$K(h) = K_{\text{sat}} \cdot K_r(h) \quad (2.27)$$

donde:

$K(h)$: Conductividad hidráulica para una presión h . (L/T).

$K_r(h)$: Conductividad relativa como función de la presión de poros (adimensional).

En el Anexo 1, se presentan una serie de ecuaciones alternativas a la utilizada en este trabajo, que permiten expresar las $K(\theta)$, $h(\theta)$, $\theta(h)$ y $D(\theta)$.

2.6.4. Ecuaciones de Transporte y Degradación de Contaminantes

La ecuación que describe el transporte de contaminantes en un medio poroso (ecuación 2.28), se deriva aplicando el principio de conservación de masa a un volumen de control infinitesimal.

$$\frac{\partial(\theta \cdot C)}{\partial t} = -\frac{\partial F_x}{\partial x} - \frac{\partial F_y}{\partial y} - \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (2.28)$$

donde:

F_i : Flujo de másico de contaminante en la dirección i [$M/L^2/T$].

C : Concentración de soluto disuelto en el fluido, es igual a la masa de soluto dividida por el volumen de fluido [M/L^3].

θ : Humedad volumétrica. [L^3/L^3].

t : Tiempo [T].

El transporte de contaminantes en un medio poroso permeable, es producido por tres procesos complementarios: advección, difusión molecular y dispersión mecánica.

- **Transporte por advección**, se denomina al proceso en el cual los solutos (contaminante) son llevados junto con el flujo de agua subterránea que fluye. El flujo de masa es igual al producto de la velocidad aparente del fluido por la concentración de contaminante disuelto, como se muestra en la ecuación 2.29:

$$F_{adv-i} = v_i \cdot C \quad i: 1,2,3 \quad (2.29)$$

donde:

v_i : velocidad aparente en la dirección i [L/T]

- **Transporte por difusión**, se denomina al proceso en que un soluto en el agua se mueve desde áreas de mayor concentración a un área de menor concentración. El proceso de difusión ocurre siempre que existe un gradiente de concentración. El flujo producido por este mecanismo es representado a través de la Ley de Fick que establece que la masa de contaminante transportada por unidad de área y tiempo es proporcional al gradiente de concentración. De acuerdo a lo anterior podemos escribir:

$$F_{dif-i} = -D^* \cdot \frac{\partial(\theta \cdot C)}{\partial x_i} \quad i: 1,2,3 \quad (2.30)$$

donde:

D^* : Coeficiente de difusión aparente (L^2/T).

El coeficiente de difusión aparente se define como el producto entre el coeficiente de difusión con un coeficiente ω que esta relacionado con la tortuosidad de un medio poroso. La tortuosidad es una medida del efecto de la dirección del flujo seguida por una molécula de agua en un medio poroso.

- **Transporte por Dispersión Mecánica**, se denomina al proceso de transporte producido por la fluctuación a pequeña escala de la velocidad del flujo, producto de los distintos recorridos que sigue el fluido entre los poros del medio.

Para el caso de medios porosos homogéneos y volúmenes de control tales, que los tiempos de mezcla transversal sean pequeños en comparación al tiempo requerido para el transporte por advección longitudinal, los procesos de dispersión que afectan el transporte de contaminante se conocen como dispersión mecánica, los cuales tienen una formulación matemática similar a la difusión molecular. El flujo de soluto transportado por el proceso de dispersión mecánica es modelado mediante una generalización de la Ley de Fick (2.31)

$$F_{disp-i} = -D_{ij} \cdot \frac{\partial(\theta \cdot C)}{\partial x_{ij}} \quad i: 1,2,3 \quad (2.31)$$

Los coeficientes D_{ij} se conocen como coeficientes de dispersión mecánica y son función de la dispersividad longitudinal α_L , de la dispersividad transversal α_T y de los valores de las velocidades de poros definidas en

$$v_i^* = \frac{v_i}{\theta} \quad i : 1,2,3 \quad (2.32)$$

con:

v_i^* : Velocidad de poros [L/T].

Exceptuando los casos en que la velocidad de poros es muy baja, los procesos de dispersión mecánica predominan por sobre la difusión molecular. La velocidad de poros representa el movimiento real del fluido a través del medio, considerando el área de escurrimiento del flujo igual a la fracción de la porosidad del medio ocupada por fluido. Luego, tenemos que las dispersividades las podemos escribir de la siguiente manera:

$$D_L = \alpha_L v_L^* \quad (2.33)$$

$$D_T = \alpha_T v_T^* \quad (2.34)$$

Conocer las dispersividades a priori es muy raro, pero se recomienda las siguientes reglas que son comúnmente usadas en problemas de transporte de solutos para estimar la dispersividad a pequeña escala (Selker, Kent and McCord, 1999):

$$\frac{\alpha_L}{\sqrt{k}} \approx 25 \text{ a } 50 \quad (2.35)$$

$$\frac{\alpha_T}{\alpha_L} \approx 0.1 \quad (2.36)$$

donde k es la permeabilidad intrínseca del medio poroso. La dispersividad depende de la escala de trabajo y de un modelo Fickiano que no describe completamente el proceso de dispersión, porque la dispersión no es un proceso a nivel molecular. Valores de la dispersividad medidas en columnas de laboratorio son usadas para el orden de algunos centímetros, pero en escala de campo se usan experimentos de trazadores, los cuales son experiencias que duran más tiempo que las mediciones de laboratorio (Figura 2.5). Las escalas de dispersividad cambian con el incremento de la heterogeneidad del medio poroso y variaciones en la permeabilidad a pequeña escala en los estudios de campo.

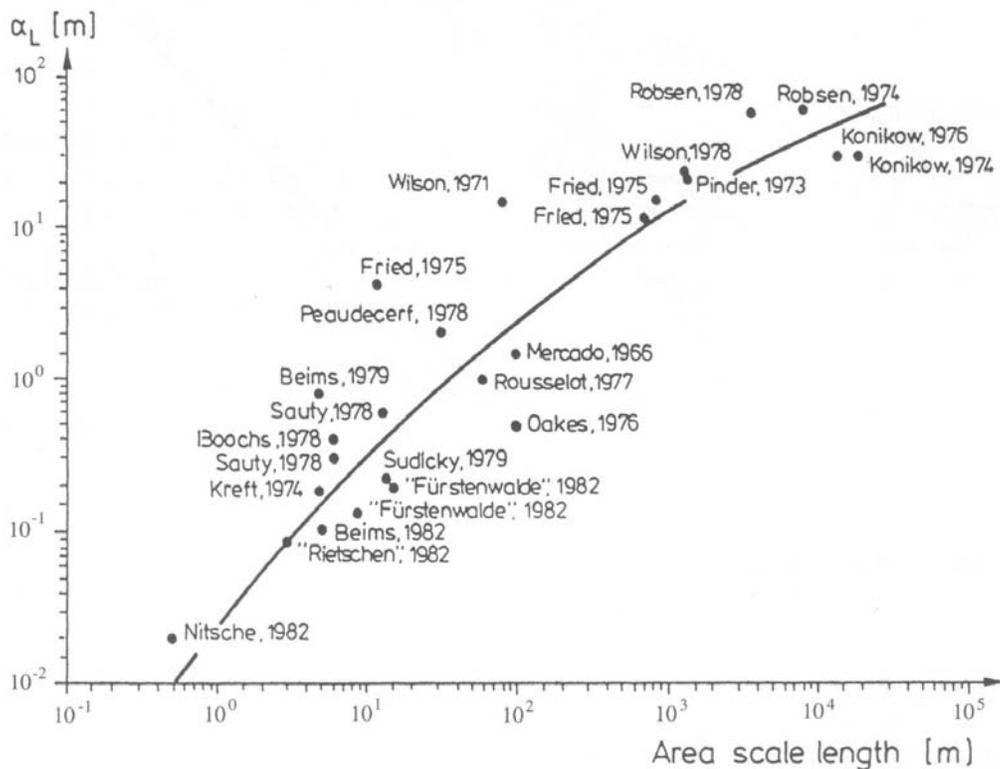
Todos los coeficientes antes mencionados se pueden resumir en un solo coeficiente de dispersión hidrodinámica:

$$D' = D_i + D^* \quad (2.37)$$

Para asignar valores a D' necesitamos saber la importancia relativa entre la difusión y dispersión. La relación entre la difusión molecular, dispersión y velocidad del agua en los poros es expresada en términos adimensionales por el número de Peclet (Pe). Este número es calculado como la razón entre la velocidad media del agua en los poros v , un largo característico expresado como el tamaño promedio de los granos d , con el coeficiente de difusión molecular D_i , a través de la siguiente relación:

$$Pe = \frac{v \cdot d}{D_i} \quad (2.38)$$

Figura 2.5
Escala de Dependencia de la Dispersividad Longitudinal



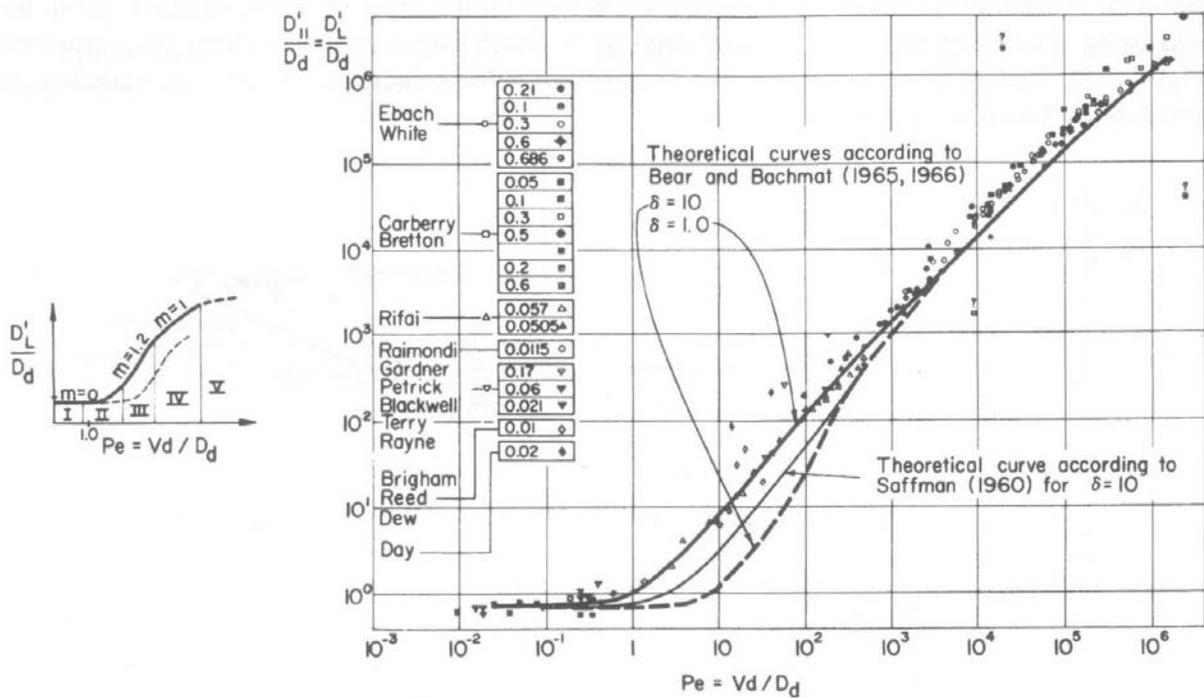
Fuente: Kinzelbach, 1986.

En la Figura 2.6, se puede apreciar que la relación que existe entre D_i y D^* puede ser bien descrita en función del Pe . La figura muestra que la curva puede ser dividida en cuatro zonas. En la Zona I, la difusión molecular domina, $Pe < 0.4$. En esta zona la velocidad del flujo es tal que el tiempo de viaje a través del medio poroso es igual o más grande que el tiempo requerido por la difusión de un soluto. En la Zona II, la difusión molecular es del mismo orden que la magnitud de la dispersión, $0.4 < Pe < 5$, y los procesos de difusión son tan importantes como los procesos de dispersión. En la Zona III, $5 < Pe < 10$ la principal propagación del contaminante es por dispersión mecánica con difusión molecular transversal y la difusión transversal reduce a la dispersión longitudinal. En la Zona IV, $Pe \geq 10$, la dispersión mecánica es dominante y la difusión es despreciable. En la Zona V, la dispersión mecánica es

importante, pero debido a la gran velocidad del agua en los poros, los efectos de la inercia y la turbulencia deben ser considerados.

Los coeficientes de difusión molecular para solutos en agua pura pueden encontrarse en manuales especializados (*handbooks*). En el caso de medios porosos, este coeficiente de difusión se reduce a la tortuosidad, porosidad, estructura del medio y contenido de agua. Estos efectos los resume el llamado coeficiente de difusión efectivo (D_e). Rangos típicos van desde 10^{-9} a 10^{-14} m²/s. Para que la dispersión domine se necesita $Pe > 5$. Para suelos arenosos, con un diámetro de grano medio $d = 1 \times 10^{-3}$ m y $D_e = 10^{-11}$ m²/s se pueden despreciar los efectos de la difusión en el sentido de propagación longitudinal del soluto. Se puede observar que en la zona vadosa nos encontramos típicamente entre las regiones II y III, según la Figura 2.6.

Figura 2.6
Relaciones Entre Difusión Molecular (D_d) y Dispersión Convectiva (D_i')



Fuente: Bear, J., Dynamics of Fluid in Porous Media, 1972.

2.6.5. Ecuación de Transporte de Contaminantes

Considerando los tres procesos mencionados anteriormente, la ecuación (2.28), se puede escribir como la ecuación (2.39), que se conoce como ecuación de transporte de contaminantes del tipo advección – dispersión para un medio poroso no saturado.

$$\frac{\partial(\theta \cdot C)}{\partial t} = -\nabla \cdot [(\mathbf{D} + \mathbf{D}^*) \cdot \nabla(\theta \cdot C) + \mathbf{V} \cdot (\theta \cdot C)] \quad (2.39)$$

en donde:

- $\underline{\mathbf{D}}$: Tensor coeficiente de dispersión mecánica.
 $\underline{\mathbf{D}}^*$: Tensor coeficiente de difusión molecular.
 $\underline{\mathbf{V}}$: Vector velocidad real o de poros.

La ecuación (2.39), describe el transporte de un contaminante de tipo conservativo, o sea, no interactúa con el medio poroso. En el caso de una sustancia contaminante no conservativa, la ecuación (2.39), se puede escribir como:

$$\frac{\partial(\theta \cdot C)}{\partial t} = -\nabla \cdot [\underline{\mathbf{D}} \cdot \nabla(\theta \cdot C) + \underline{\mathbf{D}}^* \cdot \nabla(\theta \cdot C) + \underline{\mathbf{V}}(\theta \cdot C)] + r_s \quad (2.40)$$

donde:

r_s : Término que representa la atenuación, generación, decaimiento, transformación o adsorción de soluto en la fase acuosa (M/T).

Numerosas expresiones se han propuesto para los procesos de atenuación de contaminantes representado por el término r_s de la ecuación de transporte (2.39). A continuación, se indican las expresiones más utilizadas para representar dos de los procesos más importantes, adsorción y degradación microbiana.

2.6.6. Procesos de Atenuación

Existe una serie de procesos de atenuación en la zona no saturada, dentro de los que se cuentan: adsorción, degradación microbiana, filtración mecánica e intercambio iónico. En este punto se describirán las diferentes herramientas matemáticas con que se pueden representar algunos de los fenómenos antes mencionados.

2.6.6.1. Adsorción

La adsorción es un proceso por el cual los átomos en la superficie de un sólido, atraen y retienen moléculas de otros compuestos. Estas fuerzas de atracción son conocidas como "Fuerzas de Van Der Waals".

Las expresiones indicadas a continuación se conocen como adsorciones en equilibrio pues establecen un proceso de transferencia entre la fase acuosa y la fase sólida, que realiza el suelo mediante procesos del tipo físicos y químicos. Dentro de las expresiones que representan esta relación de equilibrio, las más conocidas son la isoterma lineal (2.41), isoterma de Freundlich (2.42) y la de Langmuir (2.43).

$$S = K_d \cdot C \quad \text{Isoterma Lineal} \quad (2.41)$$

$$S = K_d \cdot C^\eta \quad \text{Isoterma de Freundlich} \quad (2.42)$$

$$S = \frac{a \cdot C}{b + C} \quad \text{Isoterma de Langmuir} \quad (2.43)$$

donde:

- S : Concentración de contaminante adsorbido en el suelo [M/M].
- C : Concentración de contaminante disuelto [M/L³].
- K_d : Coeficiente de adsorción [L³/M].
- η : Coeficiente empírico (adimensional).
- a : Factor que relaciona la masa adsorbida de contaminante con la masa de suelo y la fracción de superficie cubierta (adimensional).
- b : Coeficiente de saturación [M/L³].

Como se puede observar, la isoterma de Langmuir incorpora un límite (a) para la cantidad de contaminante que puede ser adsorbido por el suelo.

2.6.6.2 Degradación Microbiana

La degradación microbiana está relacionada con la pérdida de masa o cambio en la concentración de un contaminante orgánico de tipo biodegradable en el tiempo.

Una manera simple de describir la biodegradación de contaminantes en el medio subsuperficial, consiste en modelar estos fenómenos utilizando cinéticas de orden cero o de primer orden, las cuales consisten en las siguientes modelos de biodegradación:

Cinética de Orden Cero:

$$r_c = -k_0 \quad (2.44)$$

Cinética de Primer Orden:

$$r_c = -k_1 C \quad (2.45)$$

donde:

- r_c : Tasa de reacción [M/L³/T]
- k_0 : constante de decaimiento, modelo orden cero [M/L³/T]
- k_1 : constante de decaimiento, modelo primer orden [1/T]

Las expresiones indicadas vienen implementadas en una serie de programas computacionales que se utilizan para estudiar el comportamiento del flujo y de los contaminantes en la zona no-saturada del suelo. Con estos programas se puede simular el impacto ambiental que podría generar sobre el acuífero la migración de lixiviados desde un relleno sanitario, los tiempos de retención y el avance del frente de humedad en la zona no-saturada del suelo.

2.7. Procesos De Atenuación Natural

La atenuación natural puede ser definida como un proceso mediante el cual la concentración de un lixiviado o contaminante es reducida hasta niveles aceptables mediante procesos

naturales (Bagchi, A. 1994). Bajo esta visión se han identificado una serie de procesos que intervienen en la atenuación natural: físicos, químicos, biológicos y/o mecánicos, que van a depender del tipo de suelo y del tiempo de contacto del contaminante con el suelo.

Los diversos procesos identificados que se producen en la zona no saturada del suelo, que producen la atenuación, son los siguientes:

- **Filtración Mecánica.** Está directamente relacionada con la restricción física o oposición del suelo al flujo de contaminantes suspendidos. Éste corresponde a un proceso que atrapa físicamente los componentes del lixiviado.
- **Precipitación y Coprecipitación.** Involucra la generación de compuestos insolubles debido a la mezcla, cambio de temperatura y/o composición del lixiviado que se mueve a través del suelo.
- **Sorción.** Engloba procesos de adsorción, absorción e intercambio iónico.
- **Actividad Microbiana.** Decaimiento de los compuestos orgánicos debido al uso de las bacterias en sus procesos metabólicos. (producción de ácidos orgánicos, partición de los metales, oxidación y reducción de los componentes inorgánicos, metilación de metales, producción de compuestos orgánicos complejos, mineralización de algunos componentes, etc.)
- **Cambios Gaseosos.**

El grado en que operan estos mecanismos operan dependiendo de las características físicas del suelo tales como: granulometría, capacidad de intercambio catiónico, pH, capacidad de oxido reducción, carga de contaminante, espesor de la zona no saturada, etc.

Existe una serie de factores que afectan los mecanismos de atenuación natural, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4
Efectos de los Mecanismos Sobre La Atenuación Natural

Mecanismo	Efecto sobre la Atenuación
Adsorción	Inmovilización si el cambio de pH no es alto.
Procesos biológicos	Inmovilización temporal, efectos de largo tiempo necesitan estudios adicionales.
Intercambio catiónico y aniónico	Inmovilización de los constituyentes elusión.
Filtración	Inmovilización
Precipitación	Inmovilización en muchos casos, dependen de las condiciones de pH.

Fuente: Bagchi, 1987.

Otros factores que afectan los mecanismos de atenuación natural, tenemos a:

- **Velocidad de Infiltración:** todos los mecanismos de atenuación dependen de este factor, las cinéticas de reacción que gobiernan los mecanismos de: adsorción, actividad microbiana, intercambio catiónico y aniónico, y precipitación.
- **Grado de Saturación de la Zona No Saturada:** este punto influye en los procesos biológicos y reacciones de precipitación. Un alto grado de saturación puede significar menos disponibilidad de oxígeno para la actividad microbiana, destacando predominantemente el crecimiento de bacterias anaeróbicas.

- **Estratigrafía del Suelo:** la secuencia de la estratigrafía influye directamente en los procesos de atenuación, ya que la existencia de capas de arcilla, suelos con alta carga orgánica o la existencia de óxidos de hierro, facilitan los procesos de remoción de contaminantes.

Los lixiviados están constituidos por una diversidad de compuestos orgánicos e inorgánicos; se puede decir que en la atenuación de un compuesto específico, actúa uno o más procesos de remoción. Según antecedentes recolectados por Alegría, X. (1992), las investigaciones revelan las siguientes conclusiones:

- Las arcillas resultan ser la fracción de suelos más activas en la atenuación de elementos tóxicos.
- La atenuación depende del contenido de arcilla de un suelo y de su área superficial por unidad de masa.
- La capacidad de remoción de un suelo decrece con el aumento de las cantidades removidas.
- El pH del líquido lixiviado afecta considerablemente los procesos de remoción.
- El mecanismo más activo de remoción corresponde a la sorción.
- La remoción por actividad microbiana está limitada por las condiciones que permiten el desarrollo de cultivo anaeróbico.

2.8. Comportamiento de Metales en el Suelo

Todos los suelos naturales contienen niveles traza de metales, por lo que la presencia de ellos no significa la contaminación del suelo. La concentración de metales en un suelo no contaminado está directamente relacionada con la geología del material paterno de donde el suelo fue formado. Dependiendo de la geología local, la concentración de metales en un suelo puede exceder los rangos de concentración promedio listados en la literatura (Ver Tabla 2.5). Dado el amplio rango de variación de la concentración natural en suelos, para detectar contaminación en sitios contaminados, se debe realizar un análisis o línea base de metales directamente en suelo.

Los metales se pueden encontrar en uno o más de las distintas fuentes o reservorios del suelo y son descritos por Schumen (1991):

- Disueltos en la solución de suelo.
- Ocupando sitios de intercambio en constituyentes inorgánicos del suelo.
- Adsorbidos específicamente en constituyentes inorgánicos del suelo.
- Asociados con materia orgánica insoluble del suelo.
- Precipitados puros o mezcla de sólidos.
- Presentes en la estructura de minerales secundarios o
- Presentes en la estructura de minerales primarios.

En situaciones donde los metales son introducidos por actividades antrópicas, los metales están asociados con los primeros cinco puntos presentados anteriormente.

Tabla 2.5
Contenido de Varios Elementos en Suelos

Metal	Rango Común Para Suelos [mg/kg]	Promedio Seleccionado para suelos [mg/kg]
Al	10,000 – 300,000	71,000
Fe	7,000 – 550,000	38,000
Mn	20 – 3,000	600
Cu	2 – 100	30
Cr	1 – 1,000	100
Cd	0.01 – 0.07	0.06
Zn	10 – 300	50
As	1.0 – 50	5
Se	0.1 – 2	0.30
Ni	5 – 500	40
Ag	0.01 – 5	0.05
Pb	2 – 200	10
Hg	0.01 – 0.30	0.03

Fuente: Malean, Joan and Bledsoe, Bert. 1992.

En situaciones donde los metales son introducidos por actividades antrópicas, los metales están asociados con los primeros cinco puntos presentados anteriormente.

Los metales en el suelo se deben considerar como un equilibrio multifase, por lo que la masa de metales está sujeta a transferencia de masa fuera del sistema por percolación hacia el agua subterránea, obtención de agua por parte de las plantas o volatilización. La concentración de metales en la solución de suelo, está muchas veces gobernada por un número de procesos interrelacionados, incluyendo complejación de sustancias orgánicas e inorgánicas, reacción de óxido/reducción, reacciones de precipitación/disolución y reacciones de adsorción/desorción.

Cabe señalar que muchos de los estudios realizados del comportamiento de los metales han sido llevados a cabo bajo los supuestos de equilibrio, ya que son mucho más fáciles de realizar que los aspectos de las cinéticas de reacción.

2.8.1. Los Metales en el Suelo

Los metales en la solución de suelo pueden existir como: iones metálicos libres o no acomplejados (por ejemplo Cd^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{3+}), complejos solubles con materia inorgánica o con ligandos orgánicos (por ejemplo CdSO_4^0 , ZnCl_+ , CdCl_3^-) y asociados con inorgánicos móviles y material coloidal inorgánico. La concentración total de un metal, Me_T , en la solución de suelo es la suma de la concentración de iones libre (Me^{z+}), la concentración de complejos metálicos orgánicos e inorgánicos solubles y la concentración de metales asociados con el material coloidal móvil.

Los metales pueden formar complejos solubles con ligandos inorgánicos y orgánicos. Los ligandos inorgánicos comunes son SO_4^{2-} , Cl^- , OH^- , PO_4^{3-} , NO_3^- y CO_3^{2-} . Los ligandos orgánicos que puede tener el suelo incluyen alifáticos de bajo peso molecular, aromáticos y aminoácidos y constituyentes de ácidos fúlvicos.

Otro de los puntos importantes en la presencia de metales en el suelo, es la existencia de especies acomplejantes las que afectan significativamente el transporte de metales a través de la matriz de suelo respecto a los iones metálicos libres. Con la acomplejación resultan especies metálicas las cuales pueden estar cargadas positiva o negativamente o ser eléctricamente neutras (por ejemplo CdCl_3^+ , CdCl^- , CdCl_2^0).

2.8.2. Formación en la Fase Sólida

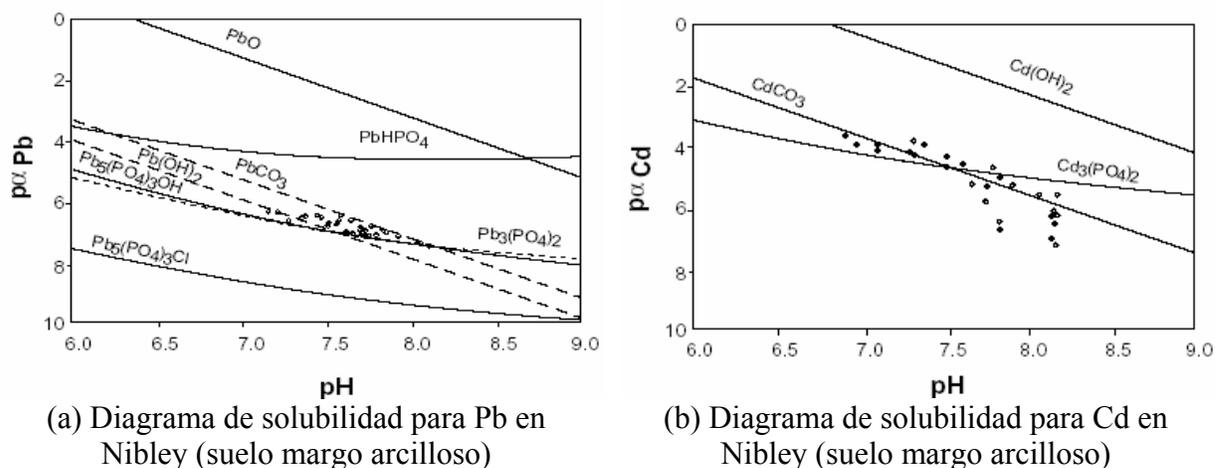
Los metales pueden precipitarse para formar una fase sólida tridimensional en el suelo. Estos precipitados pueden ser puros (por ejemplo CdCO_3 , $\text{Pb}(\text{OH})_2$, ZnS_2) o mezclas de sólidos (por ejemplo $(\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x})(\text{OH})_3$, $\text{Ba}(\text{CrO}_4, \text{SO}_4)$). Las mezclas corresponden a formaciones donde diferentes elementos co – precipitaron.

La formación de soluciones sólidas ocurren cuando los metales trazas son compatibles con los elementos de los minerales anfitrión (host) y éstos pueden reemplazar uniformemente los elementos anfitriones constituyentes del mineral.

Los diagramas de estabilidad son usados como una técnica conveniente para ilustrar como varía la solubilidad de una variedad de compuestos metálicos con el pH del suelo y con la concentración del metal o actividad.

Se puede observar en las Figuras 2.7 (a) y (b) que a medida que aumenta el pH del suelo, la concentración de Pb y Cd decrece, la cual es una tendencia usual de metales catiónicos.

Figura 2.7
Diagramas de Estabilidad para Suelos



Fuente: Malean, Joan and Bledsoe, Bert. 1992.

2.8.3. Reacciones en la Superficie

La adsorción es definida como la acumulación de iones en la interfase entre una fase sólida y una fase líquida. La adsorción difiere de la precipitación en que el metal no forma una nueva fase sólida tridimensional, pero en cambio es asociado con la superficie existente de las

partículas de suelo. La matriz de suelo generalmente incluye materia orgánica, arcillas minerales, óxidos hierro y de manganeso y hidróxidos, carbonatos y aluminosilicatos amorfos.

La materia orgánica consiste en 1) organismos vivientes 2) bioquímicos solubles (amino ácidos, proteínas, carbohidratos, ácidos orgánicos, polisacáridos, lignina, etc) y 3) sustancias húmicas insolubles. Los bioquímicos y sustancias húmicas proveen de sitios para la sorción de metales.

El contenido de materia orgánica decrece con la profundidad en el suelo, así que los constituyentes minerales del suelo llegan a ser una muy importante superficie de sorción como lo es la materia orgánica del suelo en los horizontes más superficiales.

Existen numerosos estudios de las propiedades de adsorción de las arcillas minerales, en particular de la montmorillonita y kaolinita, además de hierro y manganeso. Jenne (1968) concluyó que los óxidos de Fe y de Mn son las principales superficies sólidas que controlan la movilidad de los metales en el suelo y en el agua natural. En zonas áridas, carbonatos minerales pueden inmovilizar metales.

En la Tabla 2.6 se presentan los resultados de varios estudios relativos a la afinidad de sorción de metales relativos a la variedad de suelos y constituyentes de suelo.

Tabla 2.6
Afinidad Relativa de Metales por Suelos y Constituyentes

Suelo o Constituyente de Suelo	Orden Relativo de Sorción	Referencia
Geotita	Cu>Pb>Zn>Co>Cd	Forbes et al. 1976
Oxido de Hierro	Pb>Cu>Zn>Cd	Benjamín and Leckie, 1981
Montmorillonita	Cd=Zn>Ni	Puls and Bohn, 1988
Kaolinita	Cd>Zn>Ni	Puls and Bohn, 1988
Suelos	Pb>Cu>Zn>Cd>Ni	Buddappa et al., 1981
Suelos	Zn>Ni>Cd	Tiler et al., 1984
Suelos minerales	Pb>Cu>Zn>Cd	Elliott et al., 1986
Suelos orgánicos	Pb>Cu>Cd>Zn	Elliot et al., 1986
Suelos	Pb>Cu>Zn>Ni	Harter, 1983

Fuente: Malean, Joan and Bledsoe, Bert. 1992.

2.8.4. Propiedades del suelo que afectan la Adsorción

La capacidad de adsorción de un suelo esta determinada por el número y sitios disponibles. La adsorción de cationes metálicos está correlacionada con propiedades del suelo como pH, potencial redox, arcillas, materia orgánica sólida, óxidos de Fe y Mn y contenidos de carbonatos de calcio. En cambio la adsorción de aniones ha sido correlacionada con el contenido de óxidos de Fe y Mn, Ph y potencial redox.

Korte et al. (1976) cualitativamente ordenó la movilidad relativa de 11 metales sumado a 10 suelos (ver Tabla 2.7) para simular el movimiento de metales bajo una situación de relleno anaeróbico (anaerobic landdfill situation), para lo cual usó un lixiviado proveniente de un tanque séptico, preservado bajo dióxido de carbón y ajustado a un pH = 5. De los cationes

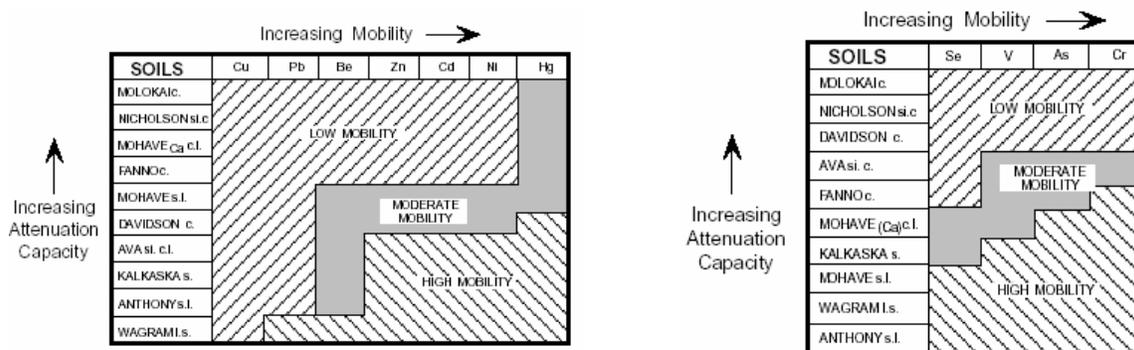
metálicos estudiados, el plomo y el cobre fueron los menos móviles y el mercurio (II) fue el más móvil (ver Figura 2.8 (a)). Los suelos de textura pesada (Molokai, Nicholson, Mohaveca y Fanno) a pHs altos fueron efectivos en la atenuación de los metales, mientras que suelos arenosos y/o suelos con bajos pH no pudieron retener o atenuar efectivamente los metales. Para los metales aniónicos, los suelos arcillosos que contenían óxidos con bajo pH fueron relativamente efectivos en retener los aniones (ver Figura 2.8 (b)). Del estudio realizado, el más móvil de todos lo metales estudiados fue el cromo (VI).

Tabla 2.7
Características de los Suelos

Suelo	pH	CIC [meq/100 g]	Área Sup [m ² /g]	Óxidos de Fe Libres %	Arcilla [%]	Textura
Wagram	4.2	2	8.0	0.6	4	Arena marga
Ava	4.5	19	61.5	4.0	31	Marga arcillo limosa
Kalkaska	4.7	10	8.9	1.8	5	Arena
Davidson	6.2	9	61.3	17.0	61	Arcilla
Molokai	6.2	14	67.3	23.0	52	Arcilla limo arcillosa
Chalmers	6.6	26	125.6	3.1	35	Limo
Nicholson	6.7	37	120.5	5.6	49	Arcilla limosa
Fanno	7.0	33	122.1	3.7	46	Arcilla
Mohave	7.3	10	38.3	1.7	11	Marga arenosa
Mohave ca	7.8	12	127.5	2.5	40	Marga arcillosa
Anthony	7.8	6	19.8	1.8	15	Marga arenosa

Fuente: Korte et al. 1976.

Figura 2.8
Movilidades Relativas De Aniones A Través Del Suelo



Fuente: Korte, Skopp, Fuller, Niebla and Alessi, 1976.

En el Anexo 2, se presenta el monitoreo de la zona no saturada, como también la técnica de realización de test de lixiviación, que permiten determinar contaminación en el suelo.

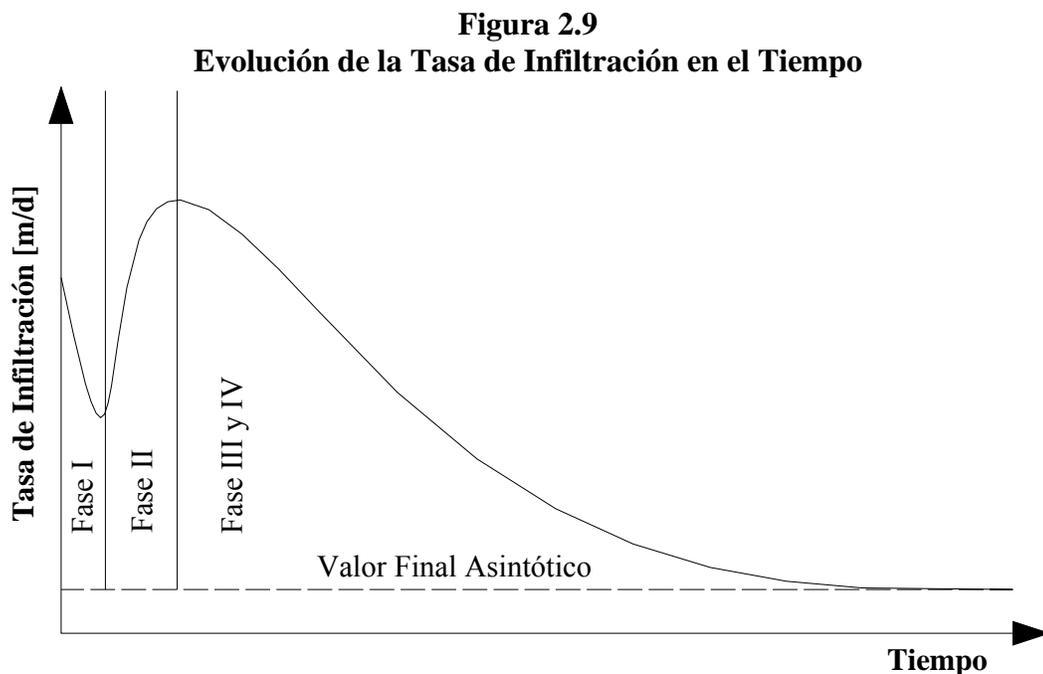
2.9. Colmatación En Medios Porosos

Una de las defensas que posee el medio poroso contra la contaminación es la colmatación o taponamiento del medio poroso, ya sea por mecanismos físicos, químicos o bacteriológicos, que producen que la permeabilidad del medio poroso vaya disminuyendo y por ende una disminución de las tasas de infiltración a lo largo del tiempo.

En la literatura se señala, que el tiempo de evolución de la colmatación está usualmente caracterizado por cuatro fases o tiempos característicos a través del tiempo, los cuales son los que se detallan a continuación.

- **Fase I:** En los primeros momentos se produce un rápido descenso de la tasa de infiltración por humectación e hinchamiento de arcillas de la parte superior del suelo.
- **Fase II:** La velocidad de infiltración crece debido a la expulsión del aire que llena los poros del terreno bajo la superficie inundada.
- **Fase III:** La velocidad decae rápidamente debido al progresivo hinchamiento de partículas arcillosas y a la formación de una capa de sedimentos o partículas que ocupan el fondo.
- **Fase IV:** La velocidad decrece lentamente después que la capa de sedimentos y partículas se ha formado y éstos se van acumulando, formando una capa cada vez mas espesa.

Cada una de estas fases, van a suceder con mayor o menor rapidez dependiendo de las características físicas y químicas del suelo y del líquido que se este infiltrando. En la Figura 2.9, se pueden apreciar en forma esquemática las etapas antes mencionadas.



Fuente: Frycklund, 1992.

De acuerdo a la literatura, en las fases III y IV la evolución de la tasa de infiltración se puede aproximar por una ecuación del tipo:

$$I = I_m e^{-\beta t} \tag{2.46}$$

En donde I_0 es el valor inicial y I_m y β son valores a ajustar.

Se distinguen cinco diferentes tipos de colmatación que se producen en el proceso de inyección o infiltración; ellos son: colmatación física, colmatación biológica, colmatación química, colmatación por producción de gas y la colmatación por compactación.

La *colmatación física* está relacionada con procesos como: sedimentación, intercepción directa, penetración profunda de los finos en el medio poroso, fuerzas hidrodinámicas y fuerzas superficiales. Los factores que influyen en este proceso son: viscosidad del agua (μ , ν), densidad de las partículas suspendidas, velocidad real del agua q (Darcy), concentración de las partículas suspendidas, tamaño medio de los poros y porosidad.

En la *colmatación biológica* aparecen procesos como crecimiento de algas y crecimiento bacteriano. Con respecto a las bacterias, factores como: porosidad del medio, temperatura del agua, concentración de carbón orgánico disuelto, concentración de amoníaco, pH y velocidad del flujo, influyen en el crecimiento de éstas, en cambio para las algas factores como luz, temperatura, cantidad de materia orgánica, nutrientes inorgánicos (N, P), sílica y pH, influyen en su crecimiento.

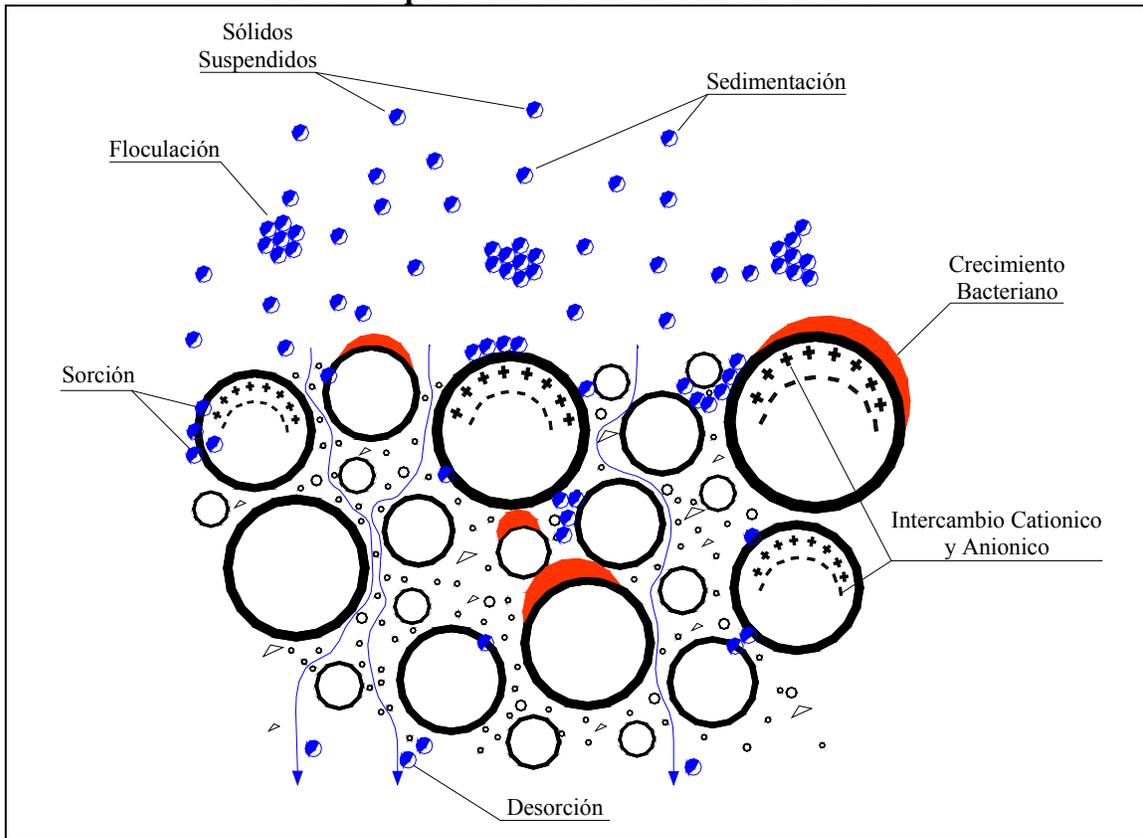
En la *colmatación por reacciones químicas* aparece la formación de precipitados. Los principales factores son: especies que estén cerca de la saturación, mineralogía del acuífero, capacidad de intercambio iónico y las fluctuaciones de temperatura. Los más comunes de los precipitados químicos son: carbonato de calcio, óxidos de fierro, óxidos de magnesio, hidróxidos de magnesio y silicatos.

En la *colmatación por la generación de Aire/Gas* aparece la formación de burbujas de aire o gas en la superficie en donde se produce la infiltración o inyección. Factores como la temperatura y la presión (separación de gas por la fase del líquido) juegan un papel muy importante en este tipo de colmatación.

La *colmatación por compactación* se produce por un exceso de agua sobre el nivel suelo, por esta causa la capa de colmatación se comprime por aumento de la presión de confinamiento, aumentando su densidad. Este tipo de colmatación ha sido ocurre principalmente en sistemas en profundidad.

Como se puede apreciar, la suma de todos estos factores en el tiempo, hace que la superficie que está en contacto con el contaminante, y específicamente en el caso del presente estudio, con los lixiviados de rellenos sanitarios o vertederos, se vaya sellando y produciéndose una atenuación natural. En forma esquemática en la Figura 2.10, se puede apreciar todos los fenómenos que se llevan a cabo en un suelo sometido a un fluido con contenidos de sólidos suspendidos y materia orgánica.

Figura 2.10
Procesos que se Producen en el Medio Poroso



Fuente: Elaboración propia.

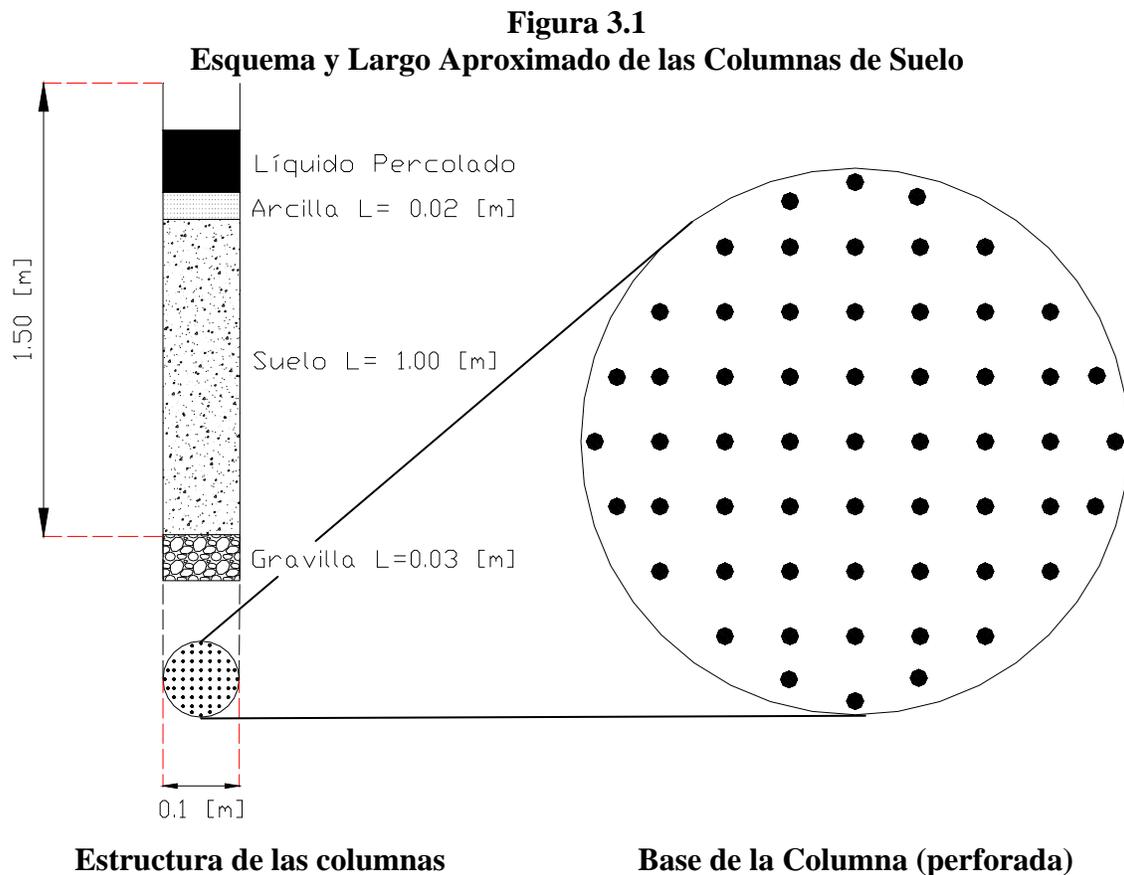
3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA EVALUAR LA ATENUACIÓN NATURAL EN SUELOS

La finalidad de este capítulo es definir toda la infraestructura que se utilizó en la realización de las experiencias para la evaluación de la atenuación natural en suelos naturales, que tuvo una duración de la fase experimental de aproximadamente dos años. Adicionalmente, se caracteriza los suelos utilizados, entregando sus principales características físicas, químicas y bacteriológicas, como así también de los lixiviados, para poder así entender mejor el flujo, transporte y procesos físico-químicos-biológicos y toxicológicos que se producen al interior de los suelos modelados.

3.1. Instalación Experimental

La instalación experimental consta de 16 columnas de PVC clase 10, que contienen los suelos analizados. La forma y dimensiones aproximadas de las columnas se pueden apreciar en la Figura 3.1, en tanto la estructura que alberga las 16 columnas de suelo en la Figura 3.2. Las dimensiones aproximadas de las columnas de PVC son: diámetro 10 [cm] y altura 1.5 [m].

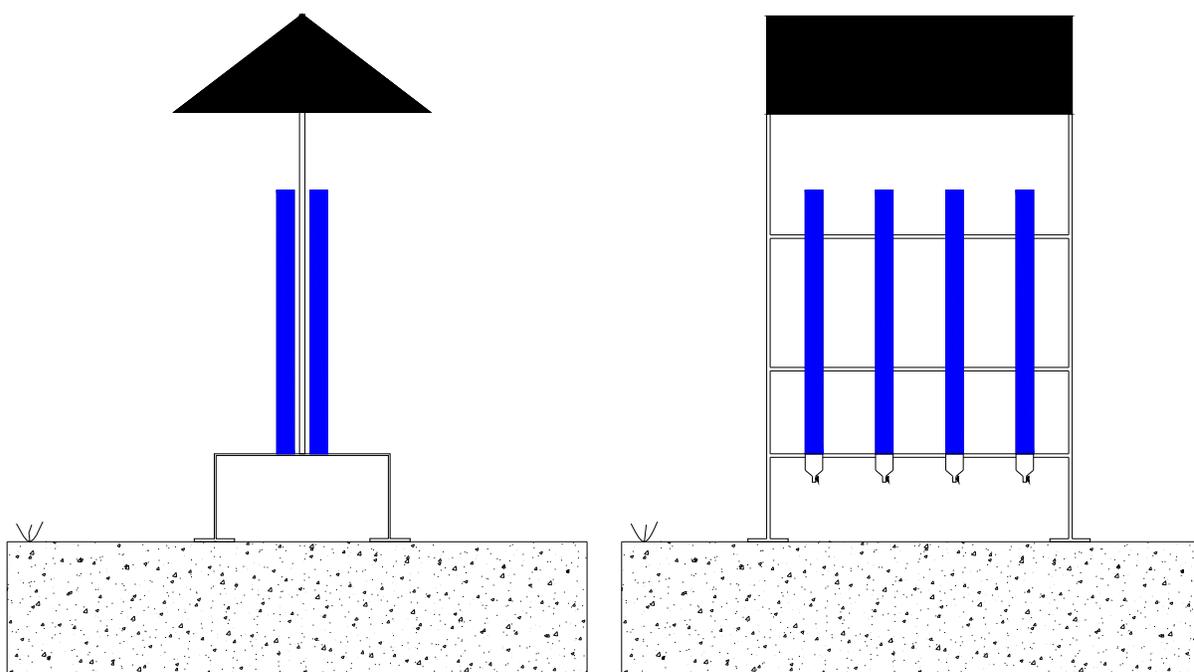
Las columnas fueron llenadas utilizando ocho suelos de características físicas, hidráulicas y químicas distintas. Se construyeron dos columnas idénticas con un mismo suelo, con características de compactación similares. El esquema de estratos utilizados en cada una de las columnas se presenta en la Figura 3.1.



Las 16 columnas de experimentación fueron preparadas de manera similar, colocando un estrato de gravilla en el fondo, como lecho soportante, seguido por un espesor de suelo de aproximadamente 1 m de espesor. Sobre el suelo se puso una capa de suelo semi impermeable, que corresponde a una arcilla reconstituida en base a una mezcla de bentonita y arena en proporciones de 50% y 50%. Finalmente se colocó una lámina de lixiviado (35 cm a 40 cm como nivel promedio) para generar la carga hidráulica sobre el sistema. La carga de lixiviado utilizada, corresponde a las recomendaciones que realiza la EPA sobre la carga de lixiviado en rellenos sanitarios.

Cada columna, posee un sistema de recolección de lixiviado en la parte inferior, el que está conectado a la atmósfera. Dicho sistema permitió llevar un control de la cantidad de lixiviados que sale de la columna.

Figura 3.2
Esquema de Plataforma de las Columnas



3.2. Caracterización De Las Columnas

Los suelos utilizados para el llenado son ocho, y tienen los nombres que se presentan en la Tabla 3.1. En la primera columna de la tabla antes mencionada se indica el lugar donde se obtuvo el suelo o la denominación del mismo, en tanto en la segunda columna se indica la abreviatura que se utilizará en el resto del informe.

Se pueden identificar dos tipos de suelos: los originales y los que son producto de mezclas. Los suelos que corresponden a mezclas S₅, S₆, S₇ y S₈, corresponden a mezclas en partes iguales de los suelos originales.

Tabla 3.1
Nombre de los Suelos Utilizados.

Nombre Suelo	Abreviatura Empleada
Cerrillos	S ₁
Las Rejas	S ₂
Arena	S ₃
Tierra de Hoja	S ₄
Cerrillos + Arena	S ₅
Cerrillos + Tierra de Hoja	S ₆
Las Rejas + Arena	S ₇
Cerrillos + Arena + Bentonita	S ₈

Las principales características de las 16 columnas se presentan en la Tabla 3.2. Aquí se pueden apreciar las tres capas que formaron cada columna. La primera capa, la de más abajo, corresponde a la grava, que tiene la finalidad trabajar como filtro, es decir de impedir el paso del suelo por arrastre de material, además de servir de soporte al suelo inmediatamente arriba del mismo. La segunda capa, el suelo propiamente tal, donde se va a producir la zona no saturada, procesos químicos y de atenuación natural. La altura de esta última capa es de aproximadamente 1 metro. Finalmente la última capa de suelo, corresponde a un suelo construido, en base a una mezcla de arena y bentonita en partes iguales y tiene por finalidad imitar el sello de arcilla que se utilizan en los rellenos sanitarios, para impedir la migración de lixiviados hacia las aguas subterráneas y como medida de seguridad, en rellenos sanitarios más modernos por posibles fallas de las geomembranas y geotextiles.

Tabla 3.2
Principales Características de las Columnas en Cuanto a los Suelos

Suelo	Columna	Δh Grava	ρ Grava	Δh Suelo	ρ Suelo	Δh Bentonita	ρ Bentonita	Peso Total Columna
		[m]	[Ton/m ³]	[m]	[Ton/m ³]	[m]	[Ton/m ³]	[kg]
S ₁	A	0.03	1.73	1.00	1.53	0.02	2.12	16.68
S ₁	B	0.03	1.73	1.00	1.60	0.02	2.21	17.26
S ₂	A	0.03	1.64	1.01	1.92	0.02	2.31	20.04
S ₂	B	0.03	1.70	1.00	1.93	0.02	2.21	19.86
S ₃	A	0.02	1.94	1.00	1.73	0.02	2.83	18.30
S ₃	B	0.03	1.61	1.01	1.73	0.02	3.40	18.52
S ₄	A	0.03	1.58	1.00	1.36	0.02	2.68	15.36
S ₄	B	0.03	1.67	1.00	1.30	0.02	2.68	14.90
S ₅	A	0.03	1.58	1.00	1.76	0.02	3.00	18.54
S ₅	B	0.03	1.61	1.00	1.72	0.02	2.21	18.42
S ₆	A	0.03	1.86	1.00	1.41	0.02	2.12	15.78
S ₆	B	0.03	1.89	1.00	1.41	0.02	2.68	15.78
S ₇	A	0.03	2.07	1.00	1.81	0.02	2.21	18.90
S ₇	B	0.03	1.76	1.00	1.78	0.02	2.55	18.82
S ₈	A	0.03	1.86	1.00	1.61	0.03	2.04	17.36
S ₈	B	0.03	1.76	1.00	1.69	0.02	2.83	18.00

Una vez concluida la etapa de llenado de cada columna, se procedió a medir la altura útil disponible y posteriormente se estimó el volumen potencial máximo útil para llenar con la carga de lixiviado. Dicho valor se puede apreciar en la Tabla 3.3. Estos son los valores

máximos que pueden ser utilizados en cada columna como carga de lixiviado, según lo diseñado y en base a lo propuesto por la EPA.

Tabla 3.3
Altura y Volumen Disponible en Cada Columna

Suelo	Columna	h_{media} [cm]	Vol Disponible [lt]
S ₁	A	42.35	3.33
S ₁	B	41.45	3.26
S ₂	A	41.25	3.24
S ₂	B	42.60	3.35
S ₃	A	41.45	3.26
S ₃	B	41.50	3.26
S ₄	A	37.30	2.93
S ₄	B	37.35	2.93
S ₅	A	42.30	3.32
S ₅	B	41.70	3.28
S ₆	A	42.15	3.31
S ₆	B	42.50	3.34
S ₇	A	41.65	3.27
S ₇	B	41.05	3.22
S ₈	A	42.80	3.36
S ₈	B	42.70	3.35

3.3. Caracterización De Los Suelos

La presente caracterización corresponde a las condiciones iniciales de operación de las columnas y contó con los siguientes puntos:

- Humedad inicial de cada uno de los suelos.
- Permeabilidad saturada.
- Análisis granulométricos de cada uno de los suelos.
- Curva de retención de los suelos (humedad versus succión).
- Capacidad de intercambio catiónico.
- Recuento de bacterias.
- Toxicidad.

Esta caracterización nos permitió dar las condiciones iniciales a los modelos numéricos de flujo y de alguna manera fijar criterios en los modelos de transporte de contaminantes. Del mismo modo, nos permitió realizar comparaciones de los comportamientos de las columnas, en cuanto al cambio de permeabilidades, número de bacterias en el perfil entre otras. Además, permitirá explicar el comportamiento de la calidad de los lixiviados de salida y realizar estimaciones o pronósticos en cuanto a la calidad de los efluentes de las columnas que no han salido lixiviados.

3.3.1. Humedad Inicial

Se define la humedad como el porcentaje de agua en volumen, que posee el suelo. Se midió para las condiciones iniciales de llenado de cada columna y los resultados se pueden observar en la siguiente Tabla 3.4.

Tabla 3.4
Humedad Inicial de los Suelos

Tipo de Suelo	θ [%]
S ₁	5.5
S ₂	11.7
S ₃	10.0
S ₄	43.7
S ₅	6.9
S ₆	16.6
S ₇	10.4
S ₈	8.5

Este parámetro fija las condiciones iniciales para los diferentes modelos de flujos en la zona no saturados.

3.3.2. Permeabilidad Saturada

Se implementó un sistema a base de permeámetros de carga constante para evaluar K_s , en donde se llenaron las columnas con suelo reconstituido, imitando la densidad de los suelos de las columnas en estudio. Además, algunos de los suelos se mandaron a realizar los estudios de permeabilidad al IDIEM de la Universidad de Chile. Los valores obtenidos para cada suelo se pueden observar en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5
Permeabilidad de los Diferentes Suelos

Tipo de Suelo	ρ Suelo [Ton/m ³]	K_s [cm/hr]
S ₁	1.42	0.16
S ₂	1.39	0.84
S ₃	1.69	13.86
S ₄	0.99	0.10
S ₅	1.57	2.49
S ₆	1.22	0.97
S ₇	1.59	3.96
S ₈	1.55	(*)

(*)Permeabilidad muy baja, no pudo ser medida en laboratorio.

3.3.3. Análisis Granulométricos

El análisis granulométrico consistió en dos partes: en una clasificación visual del suelo y luego una clasificación según la USDA, en base a los diámetros de los granos presentes en la muestra. En la Tabla 3.6, se puede apreciar el detalle de la clasificación utilizada para la clasificación de suelos.

Tabla 3.6
Clasificación USDA de Textura de Suelos

Tipo de Suelo	Diámetro de Granos
Grava gruesa o piedra	20 [mm]
Grava media	20 - 10 [mm]
Grava fina	10 - 2 [mm]
Arena Gruesa	2 - 0.5 [mm]
Arena media	0.5 - 0.25 [mm]
Arena fina	0.25 - 0.10 [mm]
Arena muy fina	0.10 - 0.05 [mm]
Limo	0.05 - 0.002 [mm]
Arcilla	< 0.002 [mm]

La clasificación de los ocho suelos estudiados se presenta en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7
Clasificación de los Suelos

Tipo de Suelo	Suelo Porcentaje de Suelo [%]							
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
Grava fina	0.0	0.0	0.0	13.5	20.6	22.6	15.2	12.0
Arena Gruesa	64.2	71.1	41.7	26.2	25.9	27.7	37.2	23.3
Arena media	12.0	13.2	32.4	18.3	24.3	14.1	27.0	17.7
Arena fina	9.2	9.8	17.8	23.9	17.2	19.1	15.2	19.0
Arena muy fina	7.3	3.1	4.1	6.8	6.0	8.3	2.3	14.0
Limo	7.0	2.7	3.9	6.5	5.7	8.0	2.2	13.5
Arcilla	0.3	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.7	0.6

En la Tabla 3.8 se una descripción visual de los diferentes suelos utilizados.

Tabla 3.8
Descripción Visual de los Suelos

Suelo	Descripción Suelo
S ₁	Arcilloso, color amarillo claro
S ₂	Suelo natural, orgánico, color negro.
S ₃	Arena negra más menos uniforme
S ₄	Tierra de hoja, negra, con alta presencia de materia orgánica (hojas y palitos)
S ₅	Mezcla de suelos
S ₆	Mezcla de suelos
S ₇	Mezcla de suelos
S ₈	Mezcla de suelos

En la Tabla 3.9 se incluyen algunos parámetros característicos de los suelos utilizados.

Tabla 3.9
Valores Característicos de los Suelos

Parámetro	Suelo / Porcentaje de Suelo [%]							
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
D ₃₅	0.48	0.60	0.32	0.23	0.31	0.24	0.38	0.14
D ₅₀	0.86	0.96	0.43	0.39	0.45	0.51	0.53	0.29
D ₆₅	1.27	-	0.56	0.75	0.69	0.97	0.80	0.50
D _M	0.65	0.71	0.39	0.64	0.53	0.60	0.59	0.40
C _U	-	-	4.38	-	-	-	4.30	-
C _C	-	-	1.28	-	-	-	1.06	-

Cabe señalar, que la granulometría del suelo S₄ (tierra de hoja), es solamente referencial y se adjuntó dentro de los resultados para tener un orden de magnitud acerca de las diferentes variables en comparación con los otros suelos.

La uniformidad de un suelo se puede expresar por el coeficiente de uniformidad (C_U), que es la relación entre D₆₀ y D₁₀, siendo el diámetro o tamaño por debajo del cual queda el 60% del suelo en peso y D₁₀ el valor correspondiente para el 10% (ver ecuación (3.1)). Un suelo con coeficiente menor que 2 se considera uniforme.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1)$$

Se define el coeficiente de curvatura según la ecuación (3.2). Un suelo con un C_C entre 1 y 3 se considera bien graduado.

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (3.2)$$

3.3.4. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico, se mide en miliequivalentes o cmol por 100 gramos de suelo (meq/100g o cmol/kg), y ésta relacionado con la capacidad del suelo de intercambiar cationes. Suelos como arcillas presentan una gran capacidad de intercambio catiónico, lo cual esta muy relacionado con la capacidad de adsorción que presenta este tipo de suelos.

Rangos de Valores de CIC, determinan algunas propiedades del suelo como se muestran a continuación:

- 1 < CIC < 10 [meq/100 gr]. Se asocia a suelos de tipo arenoso, los cuales presentan una capacidad de adsorción limitada.
- 11 < CIC < 20 [meq/100 gr]. Se asocia a limos orgánicos, los cuales presentan una capacidad de adsorción moderada.

- CIC > 20 [meq/100 gr]. Se asocian a arcillas y suelos orgánicos los cuales presentan una alta capacidad de adsorción.

En la Tabla 3.10 se presentan los valores de los diferentes suelos estudiados.

Tabla 3.10
Capacidad de Intercambio Catiónico

Tipo de Suelo	CIC pH 7.0 [meq/100 gr]	Descripción
S ₁	20.4	Suelo arcilloso
S ₂	28.8	Suelo orgánico, color negro
S ₃	2.2	Arena
S ₄	43.0	Orgánico
S ₅	10.0	Mezcla S ₁ y S ₃ (50% y 50%)
S ₆	25.0	Mezcla S ₁ y S ₄ (50% y 50%)
S ₇	11.6	Mezcla S ₂ y S ₃ (50% y 50%)
S ₈	31.2	Mezcla S ₁ , S ₃ y bentonita (33%, 33% y 33%)

La capacidad de intercambio catiónico está relacionada con factores como: superficie de contacto y cantidad de materia orgánica presente en el suelo. En base a estos antecedentes, podemos decir que suelo S₄ (tierra de hoja) posee una gran capacidad de intercambio, debido a su formación en base a materia orgánica y gran cantidad de finos, en cambio, el suelo S₃ (arena) presenta una muy baja capacidad de intercambio debido a su poca superficie de contacto y casi nula cantidad de materia orgánica en su composición. Todos estos antecedentes validan los datos entregados por el laboratorio.

3.3.5. Curva de Retención de Agua

Para la curva de retención de agua se tomaron cinco puntos, abarcando una amplia gama de valores de presión. Los valores obtenidos se observan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11
Curva de Retención de Agua

Tipo de Suelo	0.3 [atm] [%]	0.6 [atm] [%]	1.0 [atm] [%]	5.0 [atm] [%]	15 [atm] [%]
S ₁	17.68	15.54	12.91	10.75	9.85
S ₂	18.03	17.12	15.48	13.28	11.07
S ₃	4.65	4.27	2.81	1.86	1.30
S ₄	29.71	27.53	26.57	24.17	22.57
S ₅	11.98	9.97	9.12	5.89	5.84
S ₆	25.16	22.59	19.44	15.48	12.87
S ₇	11.21	10.30	7.79	5.94	4.62
S ₈	36.76	31.19	30.57	28.45	19.36

Se aprecia que en el suelo S₃ (arena), para pequeñas succiones, su porcentaje de humedad es muy bajo, lo que esta indicando que le cuesta muy poco entregar el agua. En forma contraria los suelos S₁ y S₈, necesitan succiones elevadas para entregar el agua ubicada en los intersticios del medio poroso.

3.3.6. Ecotoxicidad y Recuento de Bacterias

Los bioensayos son un método para determinar la ecotoxicidad relativa de una sustancia o mezcla compleja, a través de la observación de sus efectos sobre un organismo vivo, bajo condiciones controladas. Los bioensayos se efectúan con: algas (*Selenastrum capricolnrum*), microcrustáceos (*Daphnia magna*), invertebrados (*Eisenia foetida*), peces y vegetales para ensayos de germinación de la semilla (*Lactuca sativa*). Se determina la concentración a la cual se produce algún efecto tóxico en el 50% de los organismos (CI₅₀).

Los resultados se expresaron como CL o CI₅₀ [%], correspondiente a la concentración de muestra en porcentaje que produce efecto tóxico al 50% de los organismos en prueba, cuyo valor se estimó mediante el software Probit Analysis Program, Versión 1.5, suministrado por la US EPA. Las unidades tóxicas (UT) corresponden al valor recíproco de la CL o CI₅₀ [%] multiplicado por 100. La valoración de peligrosidad se basó en el modelo propuesto por Dutka (1993), modificado por Castillo y Col. (2000) el que se presenta en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12
Esquema De Puntaje Para La Clasificación De Toxicidad (EVP1)

Efecto Tóxico		Grado de Toxicidad
CL ó CI ₅₀ (%)	UT	
> 90	< 1.1	Atóxica
89.9- 75	1.1-1.33	Tóxica leve
74.9 – 50	1.34 – 2	Tóxica
49.9 – 25	2.01 – 4	Muy tóxica
< 25	> 4	Tóxica extrema

Se puede apreciar en la Tabla 3.13 que la totalidad de los suelos en su forma original (no mezclas), son atóxicos, como era de suponer en una condición natural sin contaminación. Por tal razón, no se realizó el estudio de toxicidad para mezclas de suelo y se consideró que son atóxicos, bajo el supuesto que no habría sinergismo entre los suelos.

Otro parámetro que se midió como factor que afecta la atenuación en los suelos, es el total de bacterias viables, que permiten la degradación de las sustancias orgánicas e inorgánicas, presentes en el líquido que atraviesa la columna, bajo condiciones aeróbicas. Dichos valores los podemos encontrar en la Tabla 3.14. Las bacterias heterótrofas cierran el ciclo de la materia en los ecosistemas al degradar casi cualquier sustancia orgánica a sus elementos inorgánicos originales.

Tabla 3.13
Toxicidad Aguda de los Diferentes Suelos

Tipo de Suelo	<i>Daphnia</i> Cl_{50-48h} [%] Peso Seco	<i>Hydra</i> Cl_{50-96h} [%] Peso Seco	<i>Lactuca</i> Cl-5d [%] Peso Seco
S ₁	Atóxico	Atóxico	Atóxico
S ₂	Atóxico	Atóxico	Atóxico
S ₃	Atóxico	4.63	Atóxico
S ₄	Atóxico	Atóxico	Atóxico
S ₅	ND	ND	ND
S ₆	ND	ND	ND
S ₇	ND	ND	ND
S ₈	ND	ND	ND

ND: No determinado.

Tabla 3.14
Recuento de Bacterias Heterótrofas

Tipo de Suelo	Humedad %	Recuento /g Peso Seco
S ₁	0.47	1.40 x 10 ⁶
S ₂	0.95	1.29 x 10 ⁸
S ₃	0.99	8.20 x 10 ⁶
S ₄	2.73	1.64 x 10 ⁸
S ₅	6.92	1.33 x 10 ⁷
S ₆	16.58	1.74 x 10 ⁸
S ₇	10.38	5.00 x 10 ⁶
S ₈	8.49	4.81 x 10 ⁶

Se puede observar que los valores varían entre 10⁶ y 10⁸ bacterias por gramo de peso seco, rango que se encuentra dentro de lo esperado para este tipo de suelos.

3.4. Experiencias Realizadas y Control

El seguimiento de las columnas se efectuó a nivel semanal por alrededor de 600 días y apunta básicamente a llevar un estricto control de los caudales de entrada y salida, para poder así calibrar los modelos numéricos de flujo y posteriormente en siguientes estudios de transporte en la zona no saturada. Además de los datos de niveles y volúmenes que salen, se monitorearon datos de densidad del lixiviado, temperatura ambiental y cualquier cosa anormal que sucediese en el funcionamiento de las columnas, que sirvan para explicar fenómenos que experimentan la tendencia de algunos parámetros.

La instalación experimental se ubicó en dependencias del laboratorio HIDROLAB S.A, situado en la Región Metropolitana en la comuna de Quilicura, encargado de realizar los análisis químicos de las experiencias. Las características del sitio facilitaron una buena ventilación de las 16 columnas y el manejo de lixiviados al aire libre.

3.4.1. Seguimiento Semanal de las Columnas

En la serie de figuras (3.3 a 3.10) se presentan los niveles de lixiviados sobre el nivel del suelo, obtenidos del seguimiento semanal, en función del tiempo para cada una de las 16 columnas monitoreadas.

Se puede apreciar que los niveles de lixiviados oscilan en torno a un nivel medio, esto debido a que se mantuvo el nivel medianamente constante, agregando lixiviado por la parte superior de la columna rellenando durante cada visita o cuando fuese necesario.

Otro efecto que se puede observar dentro de los primeros 100 días, es una disminución de los niveles en forma sostenida, este hecho se produjo debido a que no se monitoreó en forma semanal este periodo y por consiguiente, no se rellenó con lixiviado las columnas no cumpliéndose la hipótesis de carga constante en este periodo de tiempo. Pasado este tiempo, la hipótesis de carga constante se cumple.

Figura 3.3
Niveles Columnas S₁A y S₁B

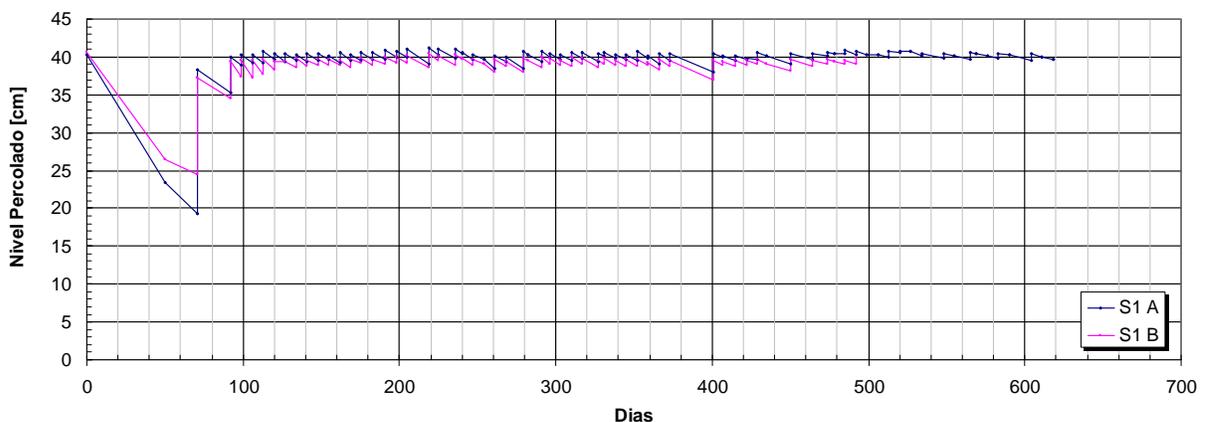


Figura 3.4
Niveles Columnas S₂A y S₂B

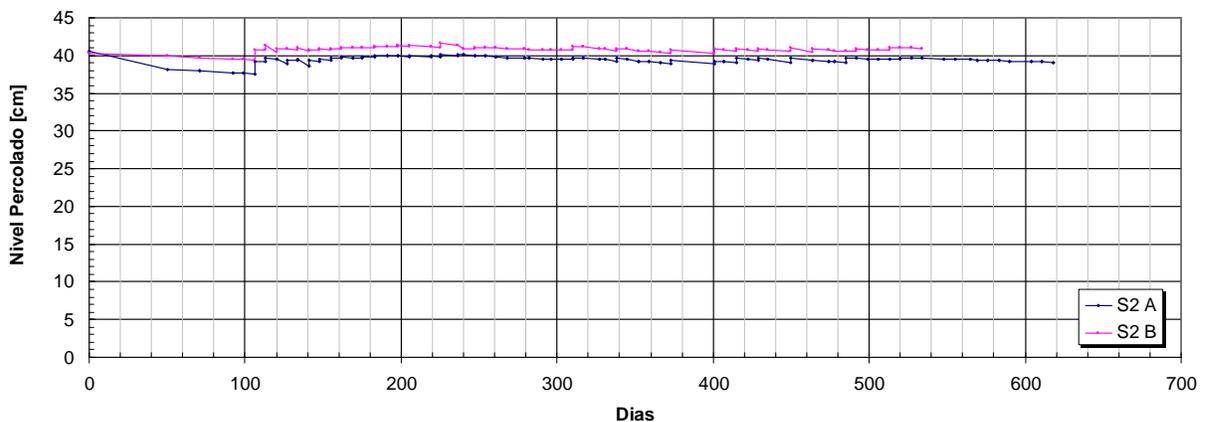


Figura 3.5
Niveles Columnas S₃A y S₃B

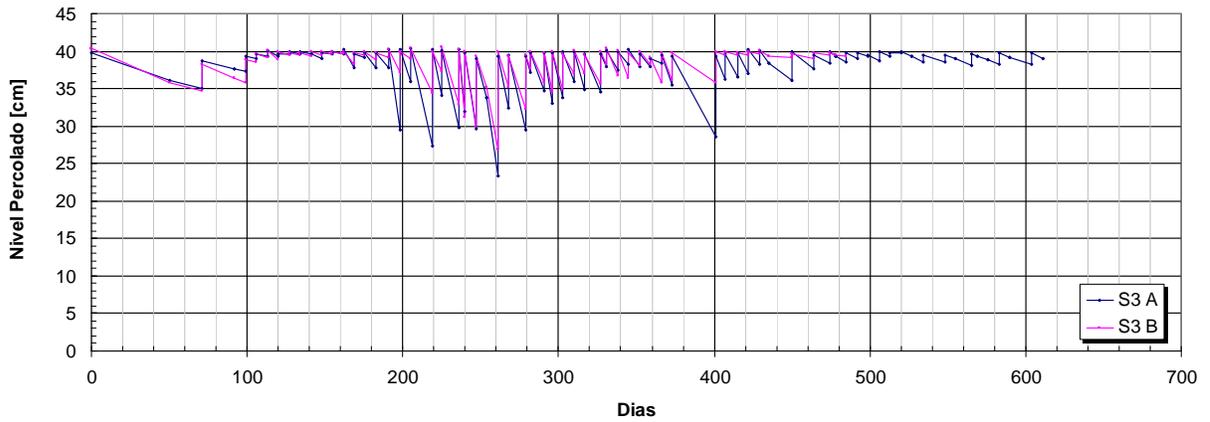


Figura 3.6
Niveles Columnas S₄A y S₄B

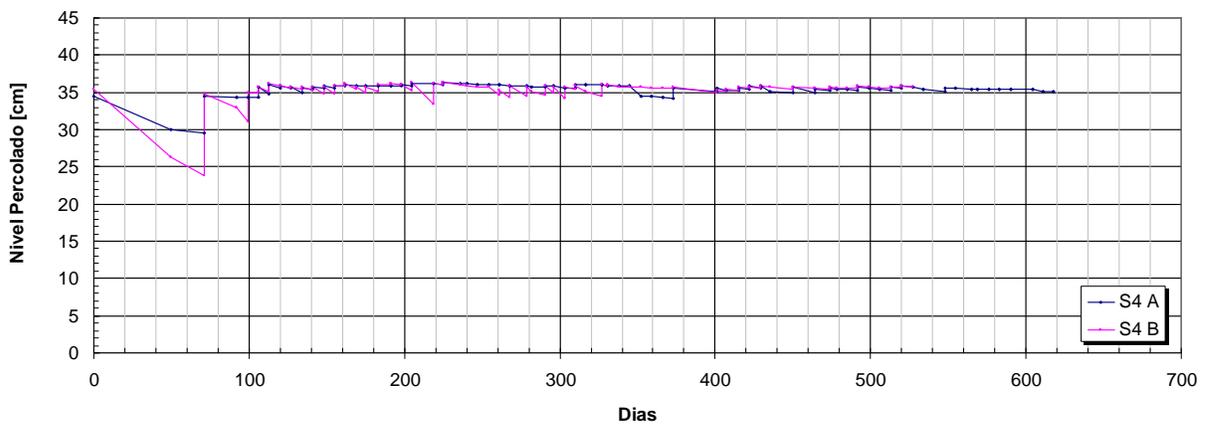


Figura 3.7
Niveles Columnas S₅A y S₅B

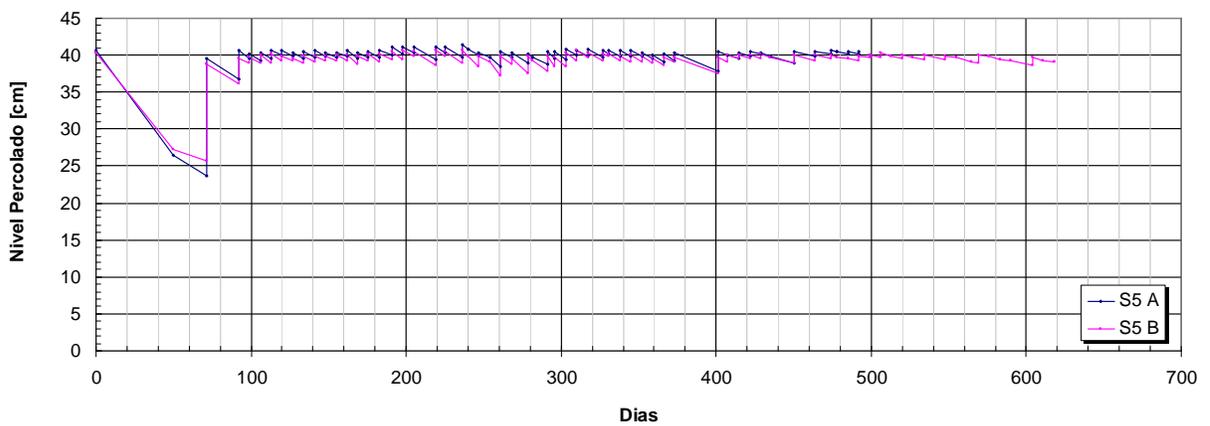


Figura 3.8
Niveles Columnas S₆A y S₆B

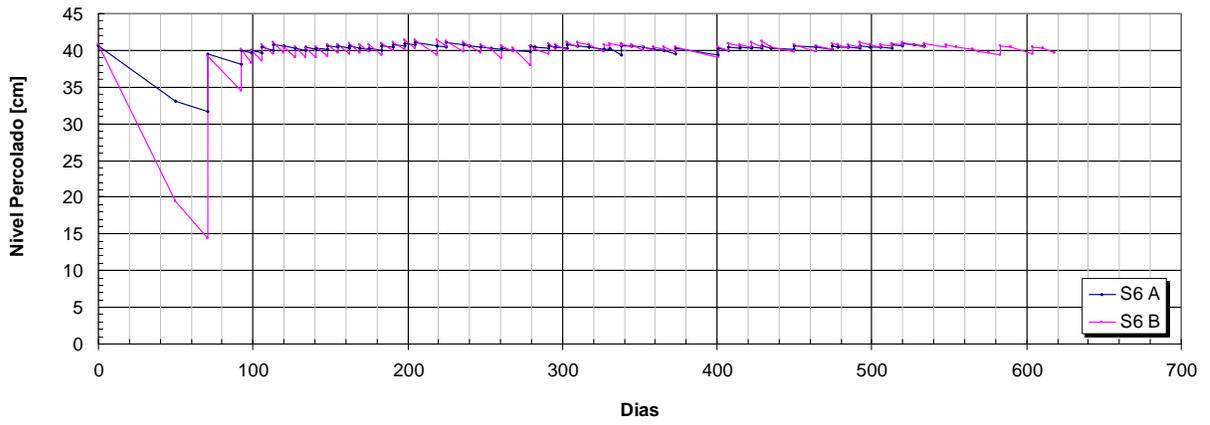


Figura 3.9
Niveles Columnas S₇A y S₇B

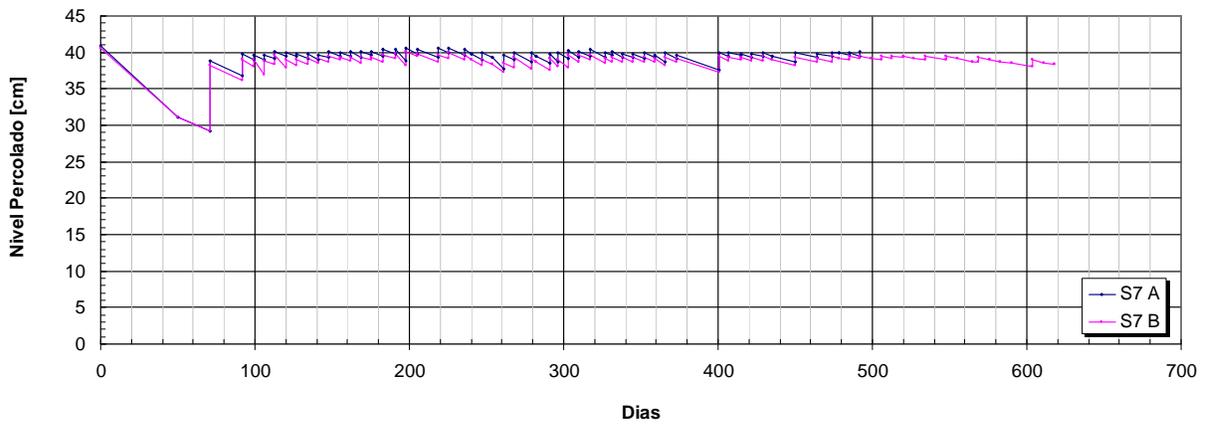
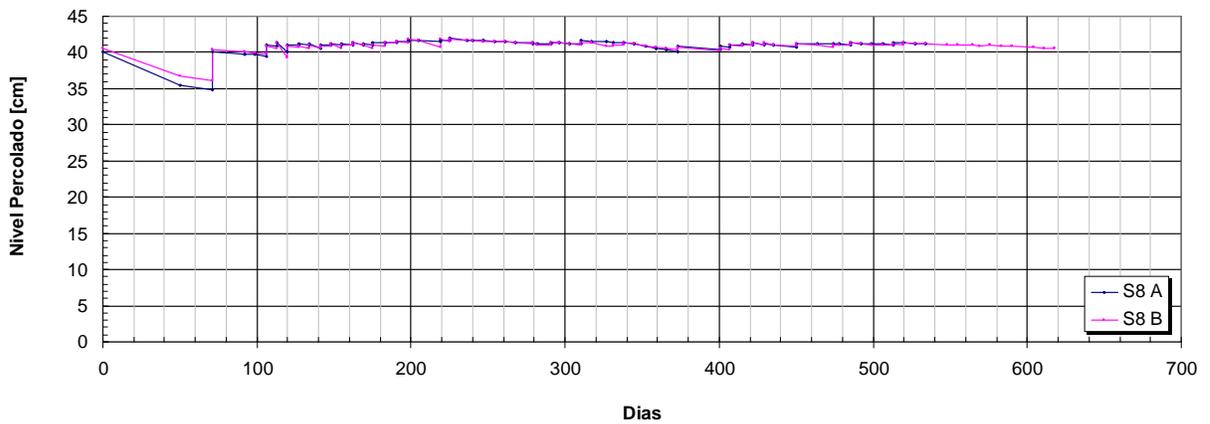


Figura 3.10
Niveles Columnas S₈A y S₈B

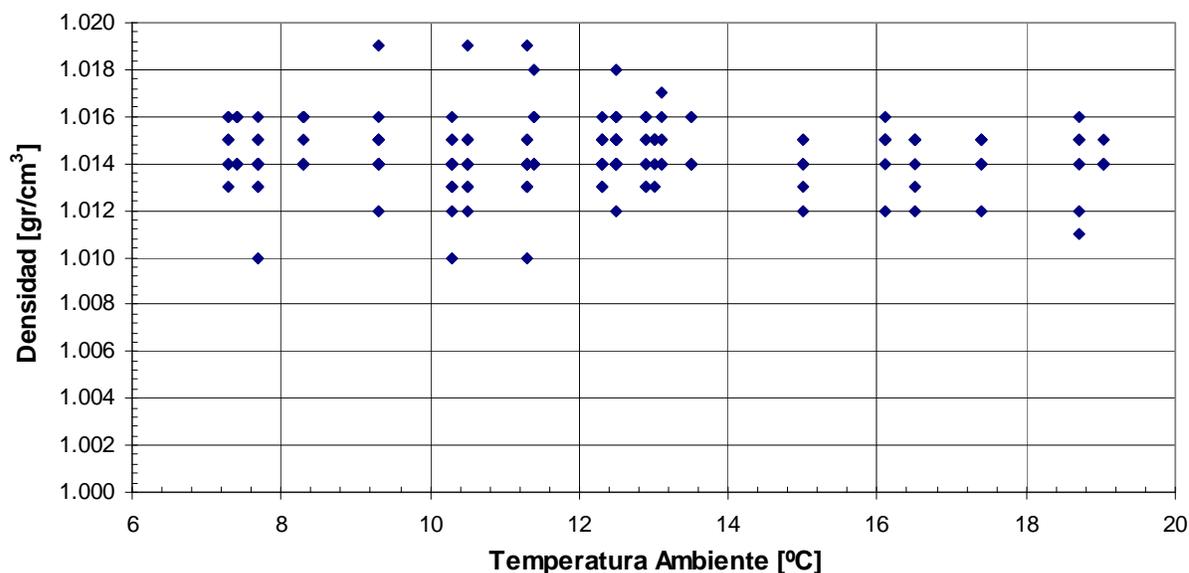


Con los datos de niveles y la geometría de las columnas, se puede calcular los volúmenes o lámina de lixiviado entrante a cada columna, además se posee los volúmenes salientes de cada una de las columnas estudiadas, lo cual se presentará en el capítulo de modelación.

3.4.2. Densidad del Líquido Lixiviado

Se procedió a medir la densidad del líquido lixiviado que se ubica sobre la columna de suelo en conjunto con la temperatura ambiente, para ver si existe alguna relación entre las dos variables. En la Figura 3.11, se presenta los datos obtenidos para 23 visitas, correspondientes a las mediciones en todas las columnas, en los cuales incluye un amplio rango de temperaturas ambientes, los que nos permitió realizar algunos supuestos para modelar un flujo con densidad diferente a la del agua, a través de modelos numéricos, utilizando una teoría aplicable al agua.

Figura 3.11
Densidad del Lixiviado v/s Temperatura Ambiente



En base a la información presentada en la Figura 3.11, se puede afirmar que la variación de la temperatura ambiente, afecta directamente la densidad del líquido lixiviado. No obstante, uno de los supuestos importantes realizados fue que la densidad del líquido lixiviado es muy parecida a la del agua. Mediciones realizadas en terreno indican que la densidad del líquido lixiviado, varía entre 1.010 y 1.019 gr/cm³, lo que significa un error de entre 1.0% y 1.9%, lo que es despreciable y se puede incluir dentro de los errores de aforo y medición de niveles.

3.5. Caracterización de los Lixiviados Entrantes

La composición de la basura que llega a un relleno sanitario no es homogénea a lo largo del tiempo de operación de éste. Por lo tanto la calidad de los lixiviados que se generan cambia continuamente en el tiempo. Bajo esta visión se optó por utilizar dos lixiviados de diferentes rellenos sanitarios que operan en la Región Metropolitana. Para cuantificar el efecto antes

mencionado, se realizó una completa caracterización química y toxicológica de los lixiviados disponibles, las cuales se realizaron en dos periodos de tiempo.

Los análisis a los lixiviados provenientes de dos rellenos sanitarios, se realizaron al momento de: obtener la muestra de líquido lixiviado (t = 0 días), al momento de cambiar y después de un tiempo apreciable de operación. En la Tabla 3.15, se presenta un completo análisis de los lixiviados utilizados en las experiencias.

Tabla 3.15
Análisis Químico de los Lixiviados Entrantes

Parámetros	Unidades	Lixiviado 1		Lixiviado 2	
		T = 0 días	T = 277 días	T = 0 días	T = 325 días
		Resultados	Resultados	Resultados	Resultados
Ácido Acético	gr/L	n.d.	-	-	-
Ácido Butírico	gr/L	ad.	-	-	-
Ácido Caproico	gr/L	12.7	-	-	-
Ácido Propiónico	gr/L	n.d.	-	-	-
Ácido Valérico	gr/L	n.d.	-	-	-
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	14,650	14,150	20,250	11,700
Amoníaco	mg/LN-NH ₃	8,526	1,397	876	-
Cadmio	mg/L Cd	< 0.01	< 0.005	< 0.005	< 0.005
Cloruros	mg/L Cl	4,292	4,094	2,209	2,084
Cobre	mg/LCu	0.19	0.45	0.27	0.16
Conductividad	μS/cm	27,700	25,400	20,400	21,200
DBO ₅	mg/L	11,800	34,000	44,500	48,000
DQO	mg/L	71,250	47,550	57,450	53,800
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	16,800	10,282	9,973	10,940
Fósforo	mg/LP	65.9	35.4	56.7	48.6
Hierro	mg/L Fe	7.75	660	270	266
Manganeso	mg/LMn	5.15	43	56.3	63.2
Nitratos	mg/L N -NO ₃	16.4	5.3	4.44	0.15
Nitritos	mg/LN-NO ₂	<0.01	0.5	< 0.01	< 0.01
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L N	17,500	2,391	1,568	980
pH		6.54	7.72	5.91	5.94
Plomo	mg/LPb	<0.03	<0.03	< 0.03	< 0.03
Sólidos Disueltos Fijos	gr/L	21.0	12.8	5.5	7.7
Sólidos Disueltos Totales	gr/L	24.4	16.9	15.0	1.6
Sólidos Totales	gr/L	44.8	35.7	37.0	38.9
Sólidos Totales Fijos	gr/L	22.8	17.0	17.7	20.3
Sulfatos	mg/L SO ₄	1391	971	1,076	1202
Zinc	mg/LZn	1.44	10.5	4.81	1.39

La DBO₅ y DQO indican la existencia de materia orgánica recalcitrante, de difícil descomposición en el tiempo.

Se pueden apreciar algunas inconsistencias en los datos de calidad presentados en la Tabla 3.16, como por ejemplo en el lixiviado 1. La DBO₅ aumenta en el tiempo en vez de disminuir, al igual que en el caso de hierro. En el caso del lixiviado 2, se presenta el mismo problema en parámetros como: conductividad, DBO₅, dureza total, manganeso, sólidos totales, sólidos totales fijos y sulfatos. La inconsistencia de los datos se le puede atribuir a la técnica de

muestreo empleada. Esta consistió en obtener la muestra a los $t = 0$ días directamente del relleno, en cambio la muestra empleada para el tiempo posterior fue obtenida de la parte inferior del receptáculo que los contenía.

Por la razón anteriormente expuesta, se puede decir que no es posible en función de los datos disponibles calcular, ni estimar tasas de decaimiento confiable de algunos parámetros.

En la norma de emisión de Residuos a Aguas Subterráneas (D.S. N° 46/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Publicado en el Diario Oficial el 17 de enero de 2003), establece valores máximos para obras de infiltración tales como zanjas, drenes, lagunas, pozos de infiltración, u otra obra destinada a infiltrar dichos residuos a través de la zona no saturada del acuífero. Si se plantea el escenario con una falla en el sistema de impermeabilización, se puede considerar como una emisión a la zona no saturada, podemos confrontar los valores máximos registrados de cada parámetro de la Tabla 3.15, con los propuestos por la norma de emisión a aguas subterráneas. El rango de variación de la calidad los lixiviados estudiados, se presentan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16
Comparación Valores Norma de Emisión Con Característica
De Los Lixiviados Estudiados

Parámetros	Unidad	Valor D.S. N° 46/02	Valor Mínimo Lixiviado	Valor Máximo Lixiviado
Cadmio	mg/l	0.01	< 0.01	< 0.005
Cloruros	mg/l	400	2084	4292
Cobre	mg/l	1	0.16	0.45
Hierro	mg/l	1	7.75	660
Manganeso	mg/l	0.3	5.15	43
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/l	50	980	17500
Nitrito más Nitrato	mg/l	15	0.16	16.9
Plomo	mg/l	0.2	< 0.03	< 0.03
Sulfatos	mg/l	300	971	1391
Zinc	mg/l	1	1.39	10.5

Al realizar la comparación entre los datos propuestos por la norma y los existentes del lixiviado utilizado en las experiencias, nos damos cuenta que en metales como cobre y plomo los valores alcanzados por el lixiviado son bastante bajos comparados con la norma, a diferencia con el resto de los parámetros que sobrepasan con creces los valores propuestos como máximos.

También se realizó un análisis de toxicidad al lixiviado entrante 1 y 2, y como era de suponer, todos los ensayos indican que la muestra es extremadamente tóxica. Los principales resultados se pueden apreciar en la Tabla 3.17.

Al realizar un análisis de los datos presentados en la Tabla 3.17 observamos que estos están situados dentro del rango de extremadamente tóxicos.

Tabla 3.17
Toxicidad de los Lixiviados Entrantes

Parámetro	Unidad (*)	Relleno 1 Valor	Relleno 2 Valor
<i>Daphnia</i> (Toxicidad Aguda)	CI _{50-48h}	2.12%	3.74%
<i>Hydra</i> (Toxicidad Letal)	CL _{51-96h}	0.36%	0.56%
<i>Lactuca</i>	CI-5d	10.30%	3.40%
pH	-	6.3	ND
Conductividad	μS/cm	1721	ND
Turbiedad	UNT	52	ND
S. Decantables	ml/100 ml	<0.1	ND

(*) % Peso Seco ND: No determinado.

3.6. Caracterización Columna S₃A y S₃B Entrante y Saliente

Se cuenta con una completa caracterización química de las columnas S₃A y S₃B (arena), en cuanto a los lixiviados afluente (arriba) y efluente (abajo). Esta es la única columna que se posee información con este nivel de detalle, ya que las permeabilidades permitieron recolectar la cantidad de lixiviado suficiente, para realizar los análisis deseados. En la Tabla 3.16 y 3.17, se presentan las caracterizaciones para las columnas S₃A y S₃B. Cabe señalar que se dispone de esta caracterización para dos tiempos diferentes.

Hay que tener en cuenta que las columnas S₃A y S₃B están compuestas por arenas. Dado lo anterior son las columnas que menor efecto debería esperarse desde el punto de vista de atenuación natural, ya que el suelo es básicamente inerte desde el punto de vista capacidad de intercambio catiónico, cantidad de arcillas, cantidad de materia orgánica y permeabilidades altas.

Al observar los datos destacados en **negrita**, podemos apreciar la existencia de algunos compuestos ya colmatados, es decir el efluente por la parte inferior de la columna, posee una concentración mayor que la existente en la parte superior. Un ejemplo claro, es el caso de los cloruros a los 359 días de la columna S₃A, donde la concentración saliente de la columna excede en 2784 mg/l a la parte superior.

Existe una serie de reacciones que se ve afectada por las condiciones de pH, y por la condición de oxidación-reducción. Este es el caso de los metales, que en ambientes ácidos se encuentran en solución y en cambio en ambientes básicos tienden a precipitar. Si bien en las condiciones existentes en las columnas son levemente básicas, existen una serie de otros factores, no medidos, que hacen que la situación del cobre y manganeso aumente la concentración de salida. En cambio el hierro baja ostensiblemente su concentración de salida, en ambas columnas estudiadas.

Columna 3.18
Caracterización Columna S₃A (Arena)

Parámetro	Unidad	Primer Análisis T = 359 días		Segundo Análisis T = 450 días	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	12090	13300	-	-
Calcio	mg/L Ca	7856	5960	2,780	1,350
Cloruros	mg/L Cl	2612	5396	-	-
Cobre	mg/L Cu	0.16	6.38	0.2	18.6
Conductividad	μS/cm	22200	28600	27,880	25,580
DBO5	mg/L	49500	49000	32,000	26,000
DQO	mg/L	72600	73200	50,800	35,400
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	10380	10556	9,328	5,758
Fósforo	mg/L P	47.5	20.2	47.8	25
Hierro	mg/L Fe	73.6	5.06	146.6	4.72
Manganeso	mg/L Mn	54.6	91.6	39	28.2
Nitratos	mg/L N-NO ₃	< 0.01	< 0.01	-	-
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L N	1702	2727	1,770	1276
Sulfatos	mg/L SO ₄	1273	232	-	-
pH	-	-	-	7.07	7.88

Columna 3.19
Caracterización Columna S₃B (Arena)

Parámetro	Unidad	Primer Análisis T = 359 días		Segundo Análisis T = 450 días	
		Arriba	Abajo	Arriba	Abajo
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	14,500	14,100	-	-
Calcio	mg/L Ca	7,361	5,796	-	-
Cloruros	mg/L Cl	3,055	5,125	-	-
Cobre	mg/L Cu	0.15	8.75	-	-
Conductividad	μS/cm	22,300	29,100	20,120	26,580
DBO5	mg/L	46,000	50,000	28,000	30,000
DQO	mg/L	62,000	87,100	29,534	38,066
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	9,897	10,436	-	-
Fósforo	mg/L P	34.2	28.6	34.8	21.4
Hierro	mg/L Fe	30.6	5.32	-	-
Manganeso	mg/L Mn	48.9	84.6	-	-
Nitratos	mg/L N-NO ₃	< 0.01	< 0.01	-	-
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L N	2,201	2643	1434	1266
Sulfatos	mg/L SO ₄	978	473	-	-
pH	-	-	-	7.91	8.2

Las técnicas y los límites de detección, utilizadas por el laboratorio, para cada uno de los parámetros medidos se presentan en la siguiente tabla. El análisis e interpretación de los datos se presentará en el capítulo de calibración.

Tabla 3.20
Limites de Detección de las Diferentes Compuestos

Parámetro	Unidades	Técnica Utilizada	Limite Detección
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Volumetría-Método de Titulación	1.0
Cadmio	mg/L Cd	Absorción Atómica	0.005
Cloruros	mg/L Cl	Volumetría-Método Argentométrico	1.0
Cobre	mg/L Cu	Absorción Atómica	0.01
Conductividad	us/cm 25° C	Conductivímetro con Celda	0.1
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Volumetría-Método del EDTA	1
Fósforo Total	mg/L P	Absorción Molecular -Metavanadato	0.02
Hierro	mg/L Fe	Absorción Atómica	0.02
Manganeso	mg/L Mn	Absorción Atómica	0.01
Nitrato	mg/L N-NO ₃	Electrodo de Nitrógeno-Adición de Estándar	0.5
Nitrito	mg/L N-NO ₂	Absorción Molecular -Sulfanilamida	0.01
Nitrógeno Amoniacal	mg/L N-NH ₃	Electrodo selectivo de Amonio	0.5
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L N	Digestión /Electrodo selectivo de Amonio	0.5
pH		Potenciometría	0.5
Plomo	mg/L Pb	Absorción Atómica	0.03
Sólidos Disueltos Fijos	mg/L	Gravimetría	5.0
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	Gravimetría	5.0
Sólidos Totales	mg/L	Gravimetría	5.0
Sulfatos	mg/L SO ₄	Gravimetría	5.0
Cinc	mg/L Zn	Absorción Atómica	5.0
Ácido Butírico	mg/L	Cromatografía Gaseosa	0.001
DBO5	mg/L	Electrodo de Membrana	2
DQO	mg/L	Reflujo Cerrado	1.0

Sumado a lo anterior, se poseen datos de toxicidad de los lixiviados salientes y entrantes en las columnas S₃A, S₃B y S₅B (muestra líquida de lixiviados), los cuales se pueden apreciar en la Tabla 3.19.

Tabla 3.21
Toxicidad de Lixiviados Entrantes y Salientes
Muestra Líquida

	<i>Daphnia</i> TA	UT	<i>Hydra</i> TA	UT	<i>Hydra</i> SL	UT	<i>Lactuca</i>	UT
	CI50-48h (%) Peso Seco	%	CL50-96h (%) Peso Seco	%	CI50-96h (%) Peso Seco	%	CI-5d (%) Peso Seco	%
S ₃ B Afluente	3.86	25.9	0.56	178.6	0.14	714	3.40	29.4
S ₃ A Efluente	2.90	34.5	0.77	129.9	0.09	1111	5.90	16.9
S ₅ B Afluente	3.50	28.6	0.35	285.7	0.05	2000	2.73	36.6
S ₅ B Efluente	8.72	11.5	1.10	90.9	0.07	1429	12.85	7.8

De acuerdo a la Tabla 3.17, todos los valores presentados en la Tabla 3.19 están dentro del rango de toxicidad extrema. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede apreciar que existe una leve de-toxicación en la columna S₅B, si se comparan los lixiviados afluentes y efluentes a la columna. En el caso de las columnas S₃A y S₃B, si bien no son muestras de la misma columna, se puede realizar algún tipo de comparación, debido al similar comportamiento hidráulica en

cuanto a las curvas de volúmenes acumulados. Aquí se aprecia que el líquido lixiviado entrante es menos tóxico en el caso de la *Daphnia* TA, *Hydra* (TA) y *Hydra* (SL). En el caso particular de la *Lactuca*, se aprecia una leve disminución de la toxicidad del lixiviado.

3.7. Comentarios Y Conclusiones

En base a la información entregada anteriormente podemos decir lo siguiente:

- En base a las mediciones semanales de densidad de lixiviado, se puede afirmar que modelar el flujo de líquido lixiviado como agua limpia, significa un error de entre 1.0% y 1.9%, lo que es despreciable y se puede incluir dentro de los errores de aforo y medición de niveles.
- Es muy difícil obtener algún tipo de conclusiones acerca de los datos químicos de los percolados provenientes de los rellenos sanitarios y lixiviados que atraviesan las columnas de suelo, ya que por las técnicas utilizadas, básicamente por dilución de la muestra, las precisiones que se obtienen son relativamente bajas y por lo tanto poco representativas.
- En el caso de las calidades de percolados en las columnas S₃A y S₃B (Tabla 3.18 y 3.19), los datos de calidad obtenidos por la parte inferior, representan una integración de la calidad de la columna en el tiempo.
- Para aventurar alguna conclusión más acabada acerca de la calidad de los percolados y lixiviados pasantes en la columna, se plantea la necesidad de estandarizar procedimientos de muestreo para hacer representativa la muestra, así como una elección más acabada de los parámetros a medir en base a los nuevos antecedentes recolectados.
- Estudios de toxicidad indican que el lixiviado entrante a las columnas es extremadamente tóxico.

4. ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE ATENUACIÓN NATURAL

4.1. Objetivos y Metodología de Rotura de las Columnas

Con el fin de estudiar los procesos más comunes de atenuación natural (sorción, intercambio iónico, oxido - reducción, degradación microbiana, precipitación, co precipitación y filtración que se producen en el interior de las columnas, una vez finalizada su operación fueron cuidadosamente desarmadas a fin de realizar un análisis de los componentes químicos existentes en las fracciones sólidas y líquidas del suelo, a distintos niveles. Los componentes analizados fueron acotados en su número, ya que la cantidad de muestra que se puede obtener de ambas fases fue muy limitada.

Después de realizar consultas a expertos y en la literatura especializada, se llegó a la existencia de métodos estandarizados para la extracción de componentes químicos del suelo, los llamados test de lixiviación, que serán explicados más adelante en el informe.

Para obtener muestras de los distintos niveles en las columnas se cortó cada una en trozos de 10 cm de largo con la ayuda de una sierra automática, mediante movimientos suaves y perdiendo el mínimo de material. Luego el procedimiento para cada uno de los trozos obtenidos en cada columna fue el siguiente:

- Homogenización de la muestra de suelo para hacerla más representativa del nivel en estudio.
- Almacenar en bolsa hermética para evitar la pérdida de humedad.
- Rotular claramente cada muestra.
- Refrigerar para evitar el decaimiento de ciertos compuestos degradables.

En el Anexo 3, se presenta un completo álbum de fotografías donde se puede apreciar las técnicas empleadas.

Cabe señalar, que se rescató la primera capa de arcilla y se separó para posteriores estudios, encontrándose en la mayoría de los casos, muy descompuesta por el efecto abrasivo del líquido lixiviado sobre ella.

Para el cálculo de la humedad representativa de cada trozo de la columna, se procedió a obtener una muestra de 5 gr aproximadamente e introducirla en un crisol de porcelana, que previamente fue llevado a peso constante. La muestra se mantuvo a 105 °C por 24 horas, según lo indica la norma. Una vez transcurrido el tiempo de secado, se procedió a su posterior pesado. Para obtener la humedad con respecto a la base seca, se aplicó la siguiente relación:

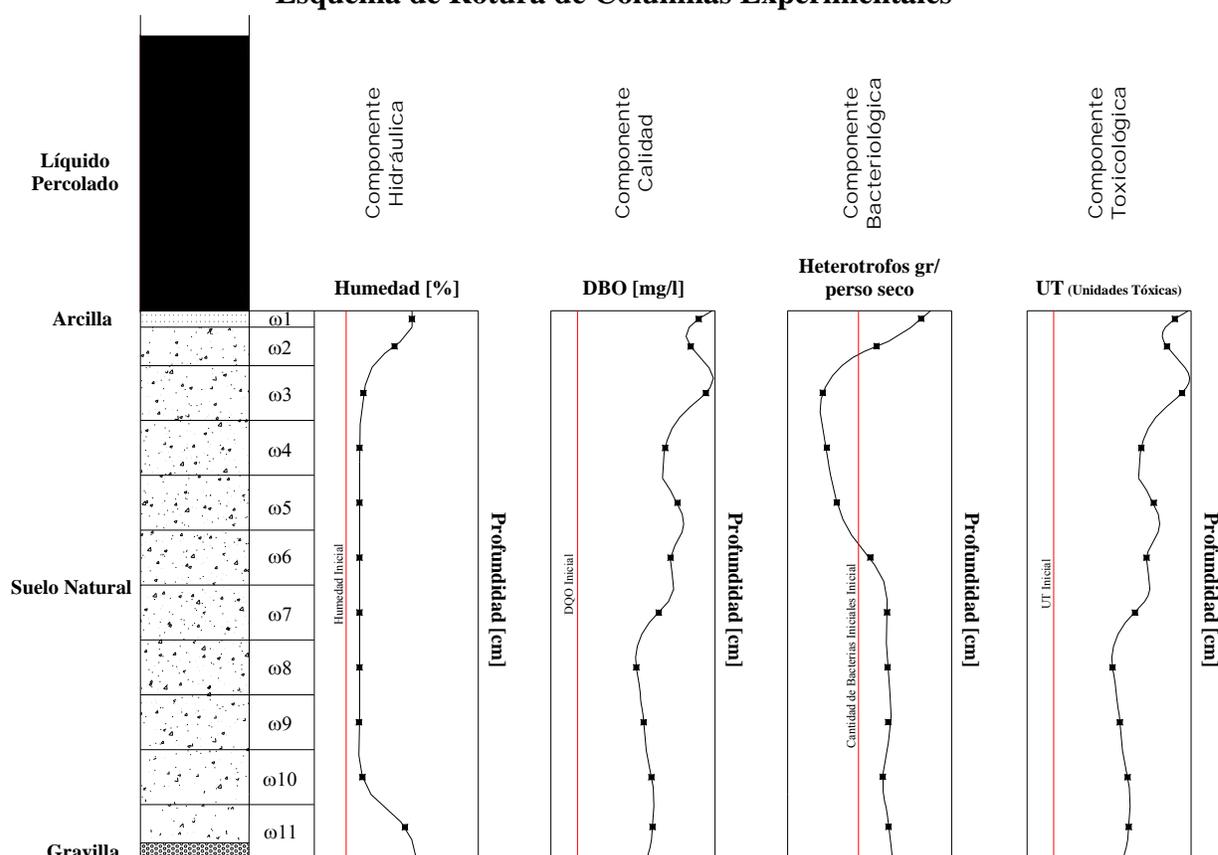
$$\theta = \frac{\text{Peso Muestra Humedo} - \text{Peso Muestra Seco}}{\text{Peso Muestra Seco}} \quad (4.1)$$

A su vez, como se tiene la ubicación vertical de cada trozo de columna, se puede obtener un perfil de humedad de la misma.

4.2. Recolección de Muestras y Análisis

Cada una de las columnas, fue dividida entre 11 y 12 partes iguales, según lo indicado en la Figura 4.1, para obtener así puntos representativos de cada uno de las componentes estudiadas: hidráulica (física), calidad (química) y por último la parte bacteriológica y toxicológica.

Figura 4.1
Esquema de Rotura de Columnas Experimentales



Fuente: Elaboración propia.

Para el estudio particular de la atenuación natural de lixiviados en la zona no saturada de las columnas experimentales, se utilizó el test de lixiviación AFNOR X31-210 (Francia, 1988), el cual extrae la fracción soluble de los contaminantes existentes en el suelo. En el Anexo 2, se presenta la metodología completa para la aplicación del test.

Se realizó solamente una extracción de lixiviado del suelo, en base a las características antes expuestas. Luego, siguiendo las recomendaciones del método se filtró la muestra por un filtro de 0.45 μm , paso seguido se analizaron las muestras en laboratorio.

Al realizar los análisis del lixiviado entregado por el test, y al corresponder la muestra a una composición de aproximadamente 10 cm de columna de suelo, el resultado obtenido fue interpretado como el valor medio del trozo de columna estudiado.

4.3. Resultados Obtenidos

Los principales resultados obtenidos en el procedimiento de lixiviación fueron los siguientes:

- **Componente Hidráulica.** Perfiles de humedad, visualización del frente de humedad y algunos perfiles de conductividad hidráulica.
- **Componente Calidad.** Se obtuvieron perfiles de: conductividad, DBO₅, DQO, fósforo, nitrógeno Kjeldahl y pH.
- **Componente Bacteriológica y Toxicológica.** Por la dificultad de la técnica y la falta de certeza en los resultados esperados, los perfiles de estos parámetros se realizaron en algunas columnas en forma más detalladas que en otras. Los perfiles obtenidos fueron: recuento de bacterias heterótrofas y toxicidad.

A continuación se presentan los principales resultados de las columnas rotas al momento de la realización de este trabajo.

4.6.1 Componente Hidráulica

Los perfiles de humedad en cada una de las columnas al momento de la ruptura, se presentan en las Figuras 4.2 a 4.5. Estas fueron utilizadas como condición final del perfil de humedad, para la calibración de los modelos de flujo en la zona no saturada.

El valor $t = 0$, corresponde a la medición en una muestra homogénea de suelo al momento de armar las columnas. En la mayoría de los perfiles, debido al paso de los percolados, cambian su contenido de humedad con respecto a la condición inicial, lo que era de esperarse, salvo en la columna S₃B, que la capacidad de acumulación es bastante pobre.

Se puede observar en la mayoría de los perfiles, un aumento de humedad en los últimos centímetros de suelo. Este efecto se explica por la condición de borde abierta a la atmósfera, donde la humedad varía en función del flujo a través del punto.

Figura 4.2
Perfiles de Humedad

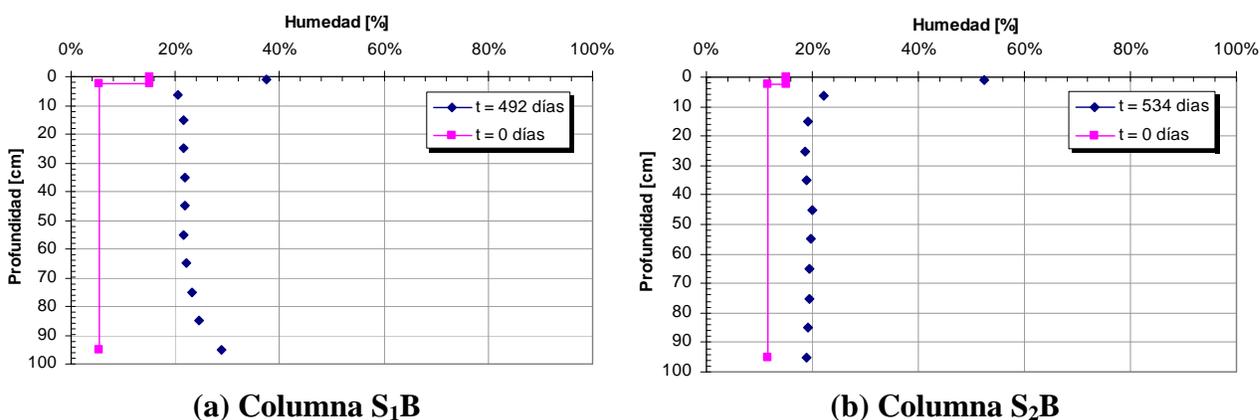
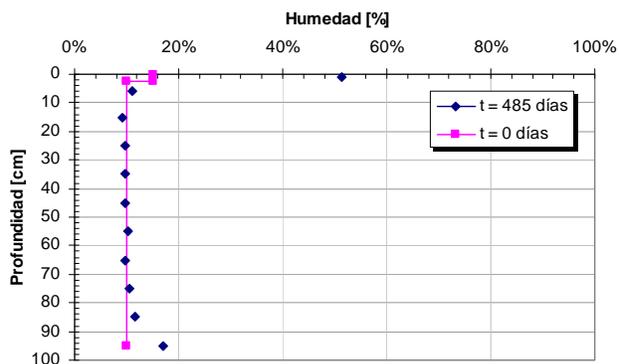
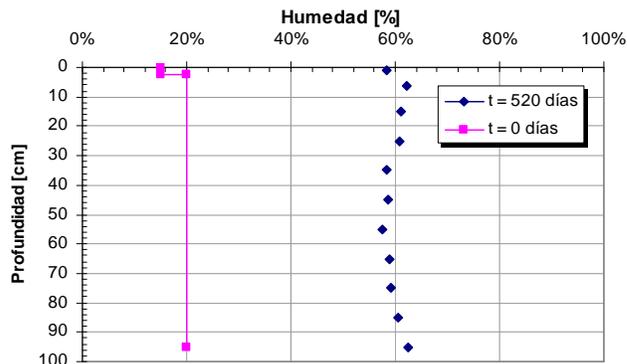


Figura 4.3
Perfiles de Humedad

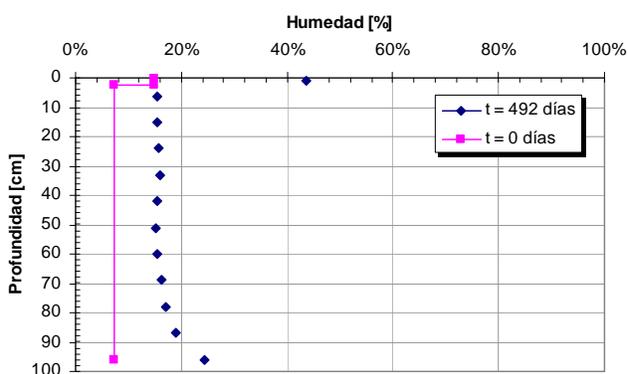


(a) Columna S₃B

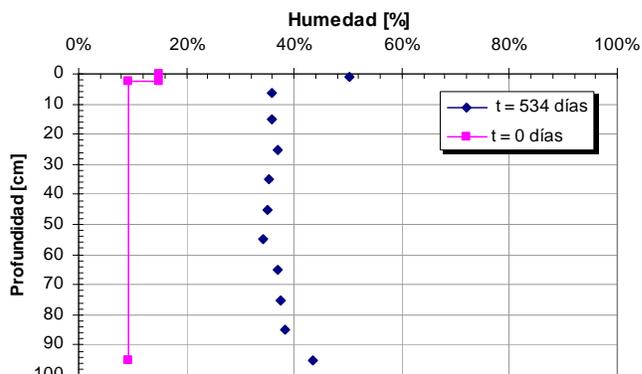


(b) Columna S₄B

Figura 4.4
Perfiles de Humedad

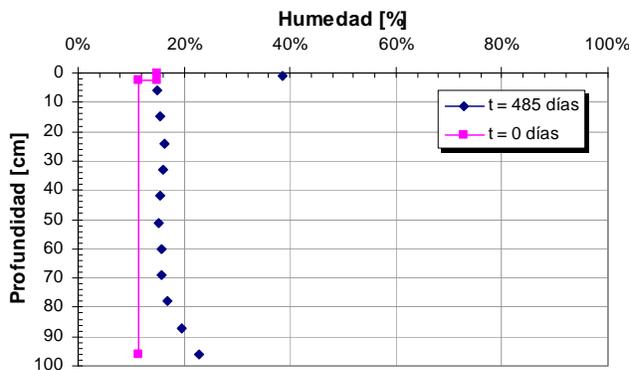


(a) Columna S₅A

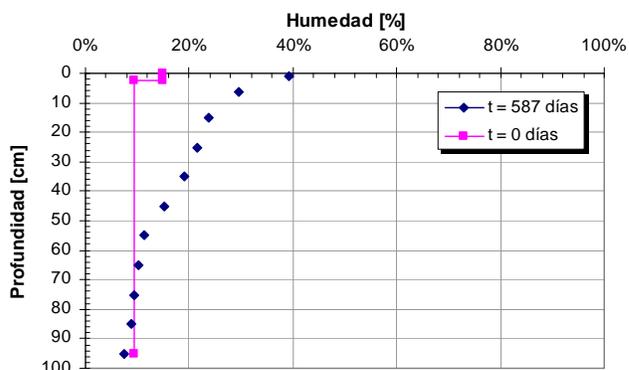


(b) Columna S₆A

Figura 4.5
Perfiles de Humedad



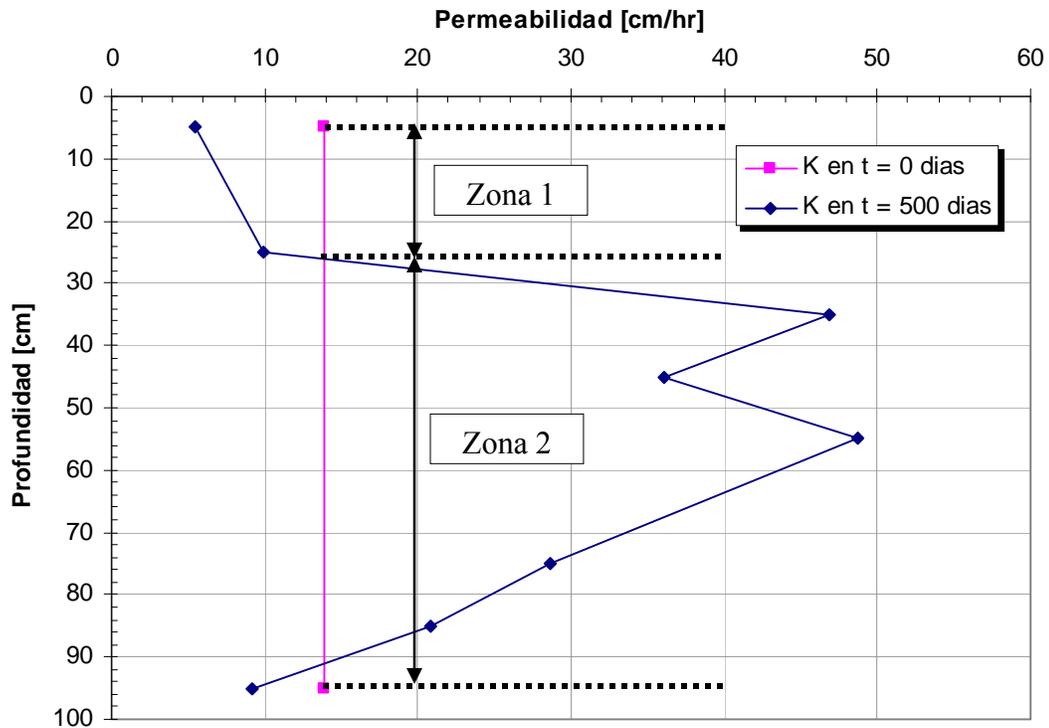
(a) Columna S₇A



(b) Columna S₈A

Se realizó un perfil de conductividad hidráulica en la columna S₃A (arena), que corresponde a una de las más permeables. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 4.6. Este perfil es puntual y no representa necesariamente el comportamiento de la totalidad de las columnas. Además, la permeabilidad en $t = 0$, es referencial ya que fue calculada en un permeámetro, tratando de reproducir lo más fielmente posible las condiciones de densidad de las columnas de experimentación.

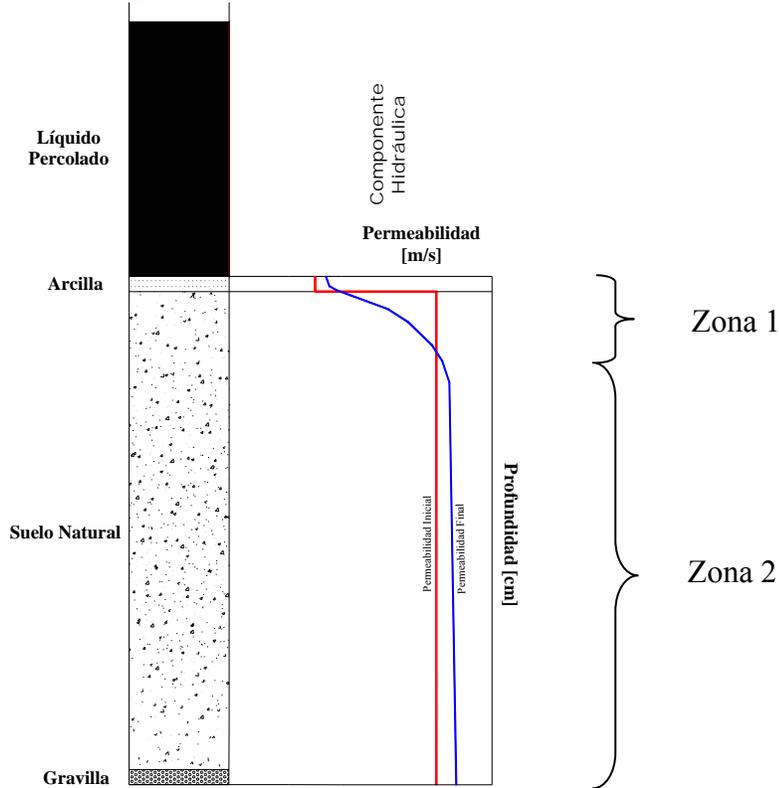
Figura 4.6
Perfil de Conductividad Hidráulica en la Vertical Columna S₃A



Se puede observar en la Figura 4.6, que existen dos zonas bien definidas. Para explicar este comportamiento se creó un modelo conceptual de la variación de la permeabilidad en la vertical, el cual se puede apreciar en la Figura 4.7.

En la zona 1, se compatibiliza un aumento de la permeabilidad de la arcilla por los efectos de la descomposición y una disminución de la permeabilidad del suelo natural, debido a los procesos de colmatación. En esta zona, por estar en mayor contacto con el lixiviado, la capa de arcilla está más expuesta a los efectos de colmatación del medio poroso hasta una profundidad aproximada de 20 cm. En cambio, en la zona 2, debido a procesos de arrastre del material fino de la matriz de suelo, la permeabilidad del conjunto se ve aumentada, con respecto a la permeabilidad del suelo original.

Figura 4.7
Esquema Conceptual De Colmatación en la Vertical

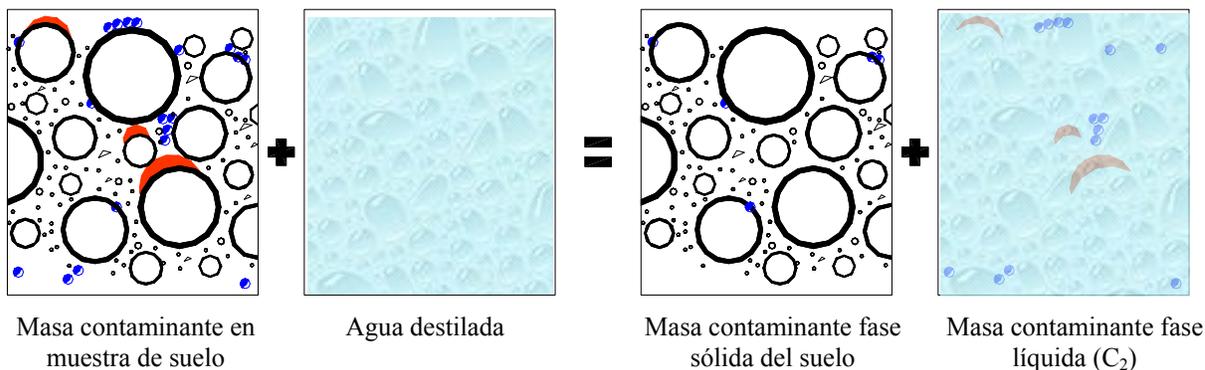


Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 Componentes de Calidad Físico, Química y Microbiológica

El agua lixiviada de cada uno de los trozos de una columnas (ver Figura 4.1) obtenida a través del test de lixiviación, corresponde a la fracción soluble del suelo. Para efectos prácticos se define como fracción soluble del suelo, todo aquel contaminante que es posible de ser extraído mediante un lavado del suelo, utilizando la norma AFNOR X31-210. En la Figura 4.8, se puede apreciar en forma esquemática el test anteriormente nombrado.

Figura 4.8
Esquema de Concentraciones Test de Lixiviación



Para evaluar los datos obtenidos se supuso que el test de lixiviación no alcanza a desprender la totalidad de la fracción adsorbida en el suelo, ya que solamente es un lavado simple por 24 horas, lo que se traduce en que la concentración de contaminante presente en el suelo no aporta al balance de masa de la fracción soluble. Luego, al realizar el balance general de masa de un contaminante cualquiera, para un trozo de suelo de 100 gramos representativo del nivel de la columna, tenemos lo siguiente:

$$M_1 = \frac{C_2 \cdot (V_{\text{Líquido}} + V_{\text{Lixiviado}})}{100 \text{ gr de suelo}} \quad (4.2)$$

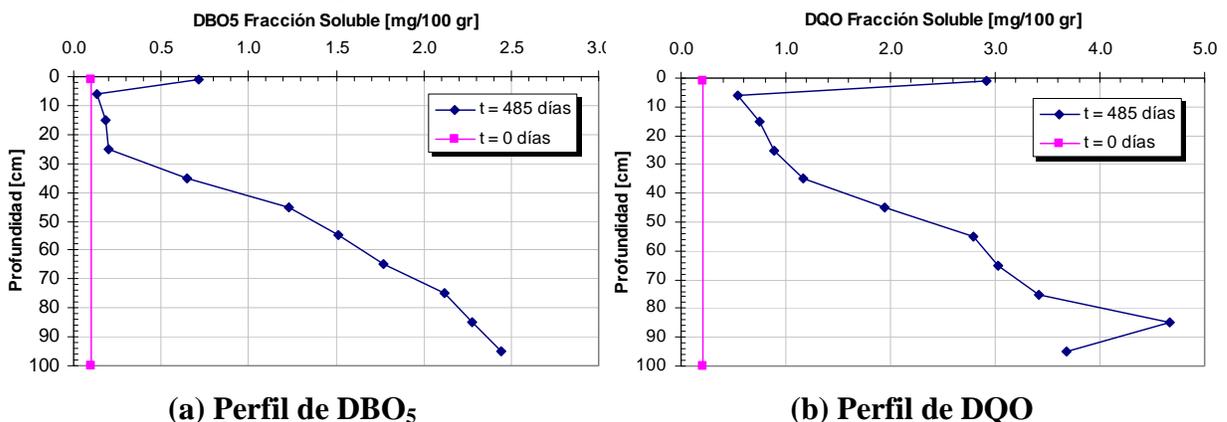
donde:

- M_1 : Masa de contaminante en la fracción soluble por 100 gramos de suelo contaminado, luego de la operación de la columna. [mg/100 gr]
- C_2 : Concentración de contaminante en el lixiviado de suelo, luego de la aplicación del test AFNOR X31-210. [mg/l]
- $V_{\text{Líquido}}$: Volumen de líquido existente en la columna. [ml]
- $V_{\text{Lixiviado}}$: Volumen de agua para realizar el test de lixiviación (1000 ml)

En base a las expresiones anteriores se puede estimar perfiles de carga de contaminante por 100 gramos de suelo de: DBO₅, DQO, fósforo y nitrógeno Kjeldahl en la fracción soluble. A modo de ejemplo en las Figuras 4.9 a 4.11 se presenta la columna S₃B, que representa la el suelo con mejor capacidad de drenaje.

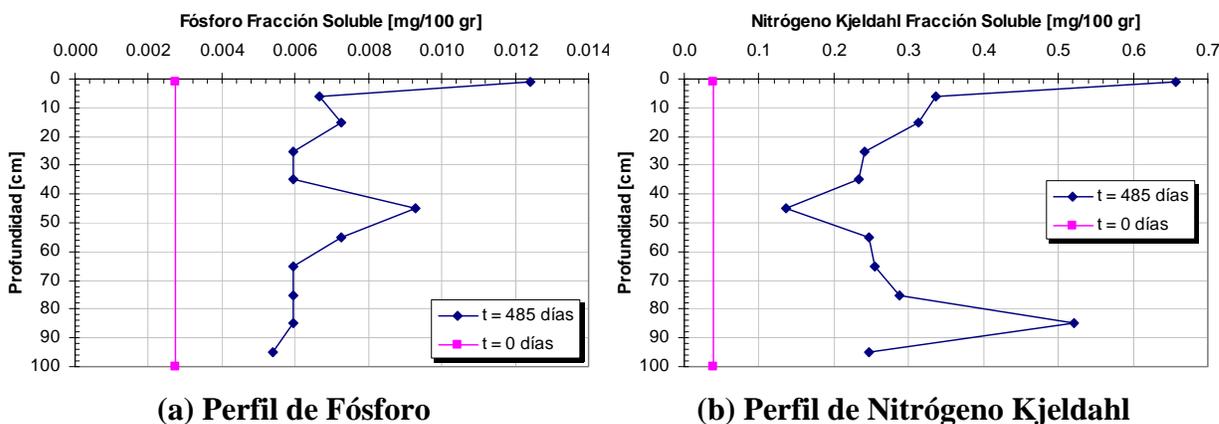
En los perfiles de DBO₅ y DQO se puede observar que se encuentran en una etapa de acumulación que todavía no ha finalizado o colmatado. Además, se puede observar una menor concentración en los primeros 30 cm de suelo, para luego aumentar en la parte inferior de la columna. Probablemente los últimos 15 centímetros están influenciados por la condición de borde inferior de la columna, abierta a la atmósfera. Por otro lado, todos los perfiles muestran en el primer punto (lugar donde se encuentra la arcilla) la existencia de una mayor masa de contaminante, lo cual coincide con lo que se esperaría en la realidad en cuanto a acumulación de masa en el estrato más superior, que se encuentra en contacto con el lixiviado.

Figura 4.9
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo S₃B



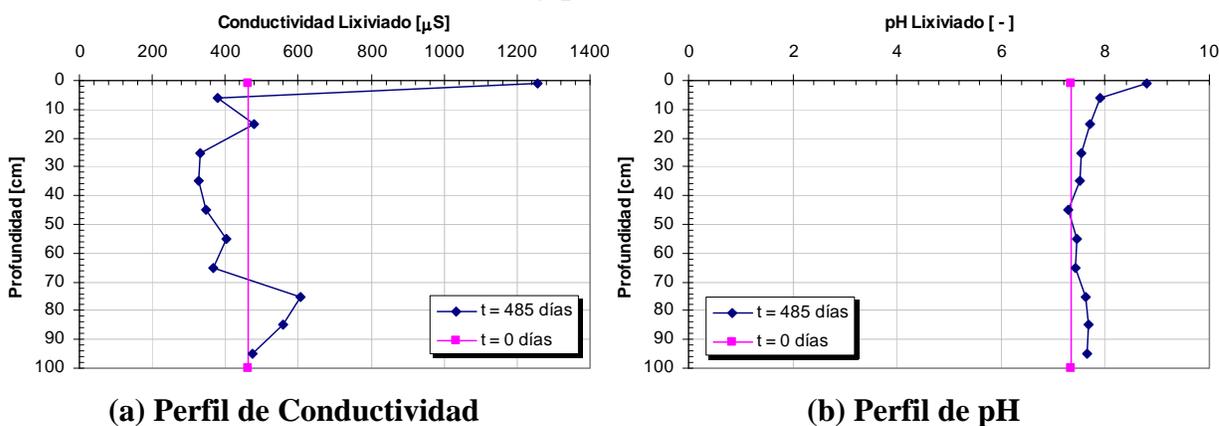
En las Figuras 4.10 (a) y (b), se puede comparar los perfiles de masa de contaminante con la concentración inicial ($t = 0$ días). Se observa que el lixiviado ocupó gran parte de su capacidad de acumulación de contaminantes del suelo, la que probablemente este asociada a adsorción y a capacidad de intercambio iónico. Una de las alternativas más probables, para explicar el comportamiento de la columna, en cuanto al fósforo y el nitrógeno, sería la colmatación de la adsorción de la columna.

Figura 4.10
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo S₃B



Existen dos perfiles adicionales con que se cuenta, que son los de conductividad eléctrica y pH del lixiviado, los cuales se miden directamente del lixiviado (no se realizan diluciones). En la Figura 4.11 (a) y (b) se presentan para el caso del suelo S₃B.

Figura 4.11
Perfiles de Conductividad y pH del Lixiviado de Columna S₃B



El caso contrario de la columna S₃B es la columna S₈A, que corresponde al suelo con peor capacidad de drenaje (suelo arcilloso), donde el frente de humedad tiene un avance aproximado de 60 centímetros y en donde no se produjo salida de percolado por la parte inferior de la columna durante la operación de la instalación experimental. Los perfiles de carga de contaminantes antes mencionados se pueden encontrar en el Anexo 4, en las Figuras 4.19 a 4.21. Como era de esperar, en torno a los 60 centímetros se puede observar un perfil de concentración, por sobre los valores para $t = 0$ días.

Hay que considerar que debido a las altas concentraciones de contaminantes en el suelo, las concentraciones del lixiviado son también bastante elevadas, lo que hace necesario realizar una serie de diluciones en la muestra, lo que se traduce en una mayor incertidumbre o error asociado a los resultados. Por la razón los perfiles antes presentados poseen una dispersión bastante alta.

En el Anexo 4, se presentan los perfiles de concentración para el resto de las columnas.

4.6.3 Componente Bacteriológica y Toxicológica

Se evaluó que las bacterias que se pueden encontrar en las columnas de suelo, bajo las condiciones experimentales de migración de contaminantes, son básicamente anaeróbicas facultativas. Por otro lado, los perfiles de bacterias realizados corresponden a bacterias aeróbicas heterótrofas. Este hecho hace que no sean representativas del medio bacteriano existente en la columna y se conviertan en solo una referencia para el presente estudio.

Del mismo modo, los perfiles de toxicidad aun cuando indicaron una pequeña disminución de la toxicidad en la vertical, no son del todo concluyentes y la interpretación de estos puede llevar a conclusiones equivocadas en cuanto a la atenuación natural desde un punto de vista toxicológico.

Dado lo anterior, los resultados obtenidos de la componente bacteriológica y toxicológica se encuentran en el Anexo 5, como antecedentes adicionales y material complementario a este trabajo.

4.4. Comentarios y Conclusiones

A modo de comentario, la exactitud de los parámetros químicos entregados por laboratorio, puede ser variable debido a la gran cantidad de diluciones realizadas, para el análisis de los perfiles de concentración. Este hecho puede indicar la dispersión de los valores y por lo tanto se deben utilizar solo de referencia.

Al observar los perfiles de DBO₅ y DQO en la mayoría de las columnas, y en especial de la columna S₃B (Figura 4.9 (a) y (b)), se aprecia la existencia de una zona en los primeros 30 centímetros de suelo, donde la concentración es menor que el resto de la columna. Esto hecho se puede interpretar por la existencia de una *zona microbiana activa* en los primeros metros bajo el sello de arcilla, que estaría produciendo una atenuación natural desde el punto de vista calidad de los lixiviados pasantes. Lo anterior no es concluyente, y deberán diseñarse a futuro experiencias que ratifiquen lo anteriormente expuesto.

Hay que tener claro, que la condición de borde inferior interfiere con los resultados obtenidos en la parte inferior de las columnas, debido a la entrada de aire. Por esta razón, existe una mayor cantidad de microorganismos, y en reacciones que se necesite oxígeno como dador de electrones para la degradación de algunos compuestos, se encuentran disminuidos en comparación con el resto de la columna.

Se puede considerar que el test de lixiviación AFNOR X31-210 es una herramienta fácil y rápida para determinar contaminación de sitios con lixiviados o cualquier otro compuesto, que pueda ser extraído por lavado del suelo.

Al analizar el fenómeno de colmatación del suelo por efectos de disminución de la permeabilidad del medio poroso, este se produce a lo largo de toda la vertical de la columna de suelo y en especial en los primeros centímetros de suelo en las columnas experimentales. Este proceso depende principalmente de la calidad del líquido que se esta infiltrando, características del medio poroso (porosidad, permeabilidad) y volumen pasante.

Todos los procesos de atenuación natural que se puedan llevar a cabo en el medio poroso, tienen un carácter acotado en el tiempo, y dependen a su vez de la cantidad del contaminante pasante, por un volumen de control determinando.

5. MODELOS DE FLUJO EN COLUMNAS DE EXPERIMENTACIÓN

5.1. Introducción

Este estudio se centró principalmente el problema de flujo a través de medios porosos no saturados. Bajo esta visión, para el proceso de calibración de las variables hidráulicas, se utilizó un esquema unidimensional de las ecuaciones de Richards (flujo), utilizando en el programa HYDRUS 1D. Una descripción del modelo se puede encontrar en el Anexo 6.

El punto de partida correspondió a la realización de un modelo conceptual de los principales procesos físicos, químicos, bacteriológicos y toxicológicos, que se llevaron a cabo en cada una de las columnas, permitiendo identificar y separar el problema de flujo y reacciones físicas, químicas y bacteriológicas, presente en cada uno de los suelos estudiados. Posteriormente se determinaron las principales variables involucradas en el proceso de flujo y los pesos sobre la función objetivo.

El proceso de calibración compatibilizó muchos criterios que tendieron a obtener la serie de parámetros óptimos para el problema en estudio. Dentro de los parámetros calibrados se tienen:

- Curvas de succión: donde los parámetros fueron θ_r , θ_s , α y n utilizando el modelo de Van Genuchten de $m = 1-1/n$.
- Permeabilidad de la capa de arcilla y suelo natural.
- Factores de evaporación en la parte superior e inferior de cada una de las columnas.

Estos parámetros se optimizaron bajo las siguientes restricciones:

- Curvas de succión dentro del rango normal de variación que aparece en la literatura, para el tipo de suelo en estudio.
- Permeabilidad dentro del rango de medición experimental.
- Minimizar los errores entre los volúmenes salientes y/o entrantes medidos de cada columna y los modelados.
- Simular lo más fiel posible la forma de los perfiles de humedad en las columnas que se rompieron.

A continuación se presentan en detalle el desarrollo de todo el proceso antes señalado.

5.2. Modelo Conceptual del Problema de Flujo

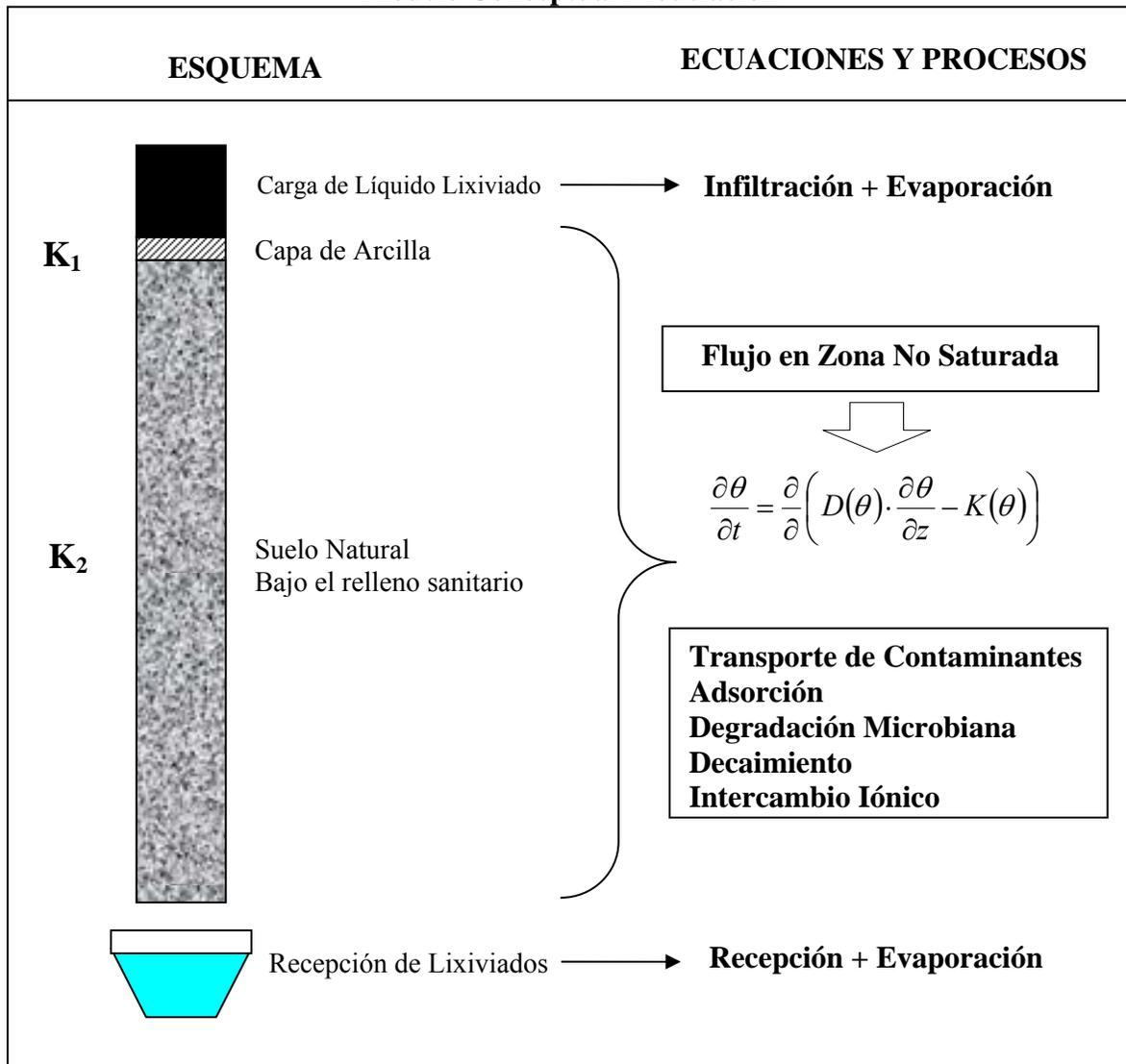
Para analizar el problema de flujo en la zona no saturada, se planteó un modelo conceptual que explicara en forma simplificada los diferentes fenómenos físicos, químicos y bacteriológicos que se producen dentro de las columnas experimentales, para así poder calibrar las principales variables hidráulicas. Dicho modelo conceptual se presenta en la Figura 5.1.

El sistema a modelar consiste dos capas de suelo con características muy distintas. La primera una arcilla reconstituida, que imita el sello impermeable bajo un relleno sanitario y que impide

el paso de los lixiviados a los acuíferos presentes bajo él. En cambio la segunda capa, denominada *suelo natural*, corresponde a un suelo típico que se puede encontrar bajo un relleno. En el caso particular de este estudio, se cuenta con un total de 8 suelos naturales, completamente caracterizados en la parte física, bacteriológica y toxicológica (ver Capítulo 3).

Debido a la existencia de dos capas de suelo, con diferentes conductividades hidráulicas, se aseguró la existencia de un flujo no saturado a lo largo de la columna. Sumado a lo anterior, la existencia de un drenaje libre, que se materializó con un soporte de gravas abierto a la atmósfera, que no permitiese la acumulación de en los poros de la columna.

Figura 5.1
Modelo Conceptual Modelación



La carga de lixiviado se modeló como una infiltración por la parte superior de la columna, sobre la capa de arcilla, en forma de pulsos de precipitación efectiva en el tiempo, esto conlleva a que los fenómenos de colmatación sean despreciados, lo que permite utilizar

conductividades hidráulicas promedios, fijas en el tiempo, para el estudio de flujo en la zona no saturada.

Por otra parte, los controles semanales de niveles de lixiviado sobre cada una de las columnas, permiten disponer de diversos puntos de calibración de los volúmenes salientes de estas, así como un perfil de humedad de las mismas al final de su vida útil, permitiendo así ajustar las variables hidráulicas relevantes del sistema.

Al realizar la modelación numérica y posterior análisis de los volúmenes salientes, tomando como volumen de control cada una de las columnas, se apreció la existencia de pérdidas de (masa) líquido percolado en el balance. Esto se tradujo en que las curvas de volúmenes acumulados salientes modelados, fueron mayores que las observadas en las instalaciones experimentales. Dado lo anterior, la diferencia entre las dos curvas, solamente se podría explicar, dadas las condiciones experimentales, por una evaporación en las columnas. Este fenómeno se incorporó en la modelación mediante factores de evaporación a nivel mensual, tomando como referencia a la estación Cerro Calán. Dichos factores se calibraron en la parte superior e inferior de cada una de las columnas, de tal manera que el error entre las curvas de volúmenes acumulados observados y simulados se minimizase. Los factores deben cumplir ciertos requisitos los cuales serán expuestos en el punto 5.3 de este capítulo.

Uno de los supuestos importantes fue que la densidad del líquido lixiviado es muy parecida a la del agua. Mediciones realizadas en terreno indican que la densidad del líquido lixiviado, varía entre 1.010 y 1.019 gr/cm³ en función de la temperatura ambiente en donde se ubican las columnas (Ver Figura 3.11), lo que significa un error de entre 1.0% y 1.9%, lo que es despreciable y se puede incluir dentro de los errores de aforo y medición de niveles.

La densidad promedio del líquido lixiviado dentro de las columnas es de 1.014 gr/cm³, además se tiene que las densidades se encuentran dentro de un rango muy definido de variación, por lo que los supuestos realizados tienen validez debido al bajo orden de oscilación detectado de las densidades.

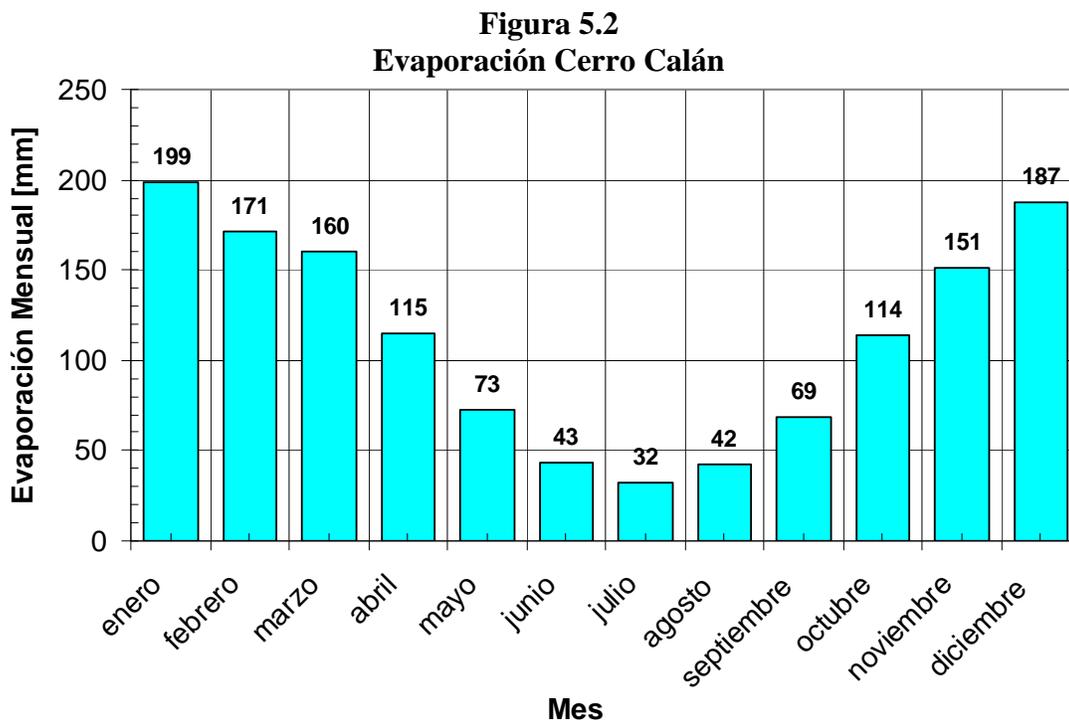
La condición de borde empleada en la parte inferior de la columna, correspondió a filtración (seepage face), que es la más utilizada en experiencias de laboratorio donde el fondo de la columna está expuesto a la atmósfera (drenaje por gravedad de la columna). Este tipo de condición es utilizada frecuentemente en lisímetros y para modelar filtraciones aguas abajo en presas de tierra. Corresponde a una condición de borde dinámica y cambia de acuerdo a las condiciones de flujo durante la simulación. Asume una altura piezométrica igual a cero en la condición de borde, tanto tiempo como que la altura piezométrica sea negativa. Por otro lado, cuando la parte inferior de la columna se empieza a saturar, se impone una presión igual o menor a cero en el fondo de la columna y el flujo saliente es calculado. En términos numéricos, tenemos que lo anterior se representa matemáticamente de la siguiente manera:

$$q(h) = \begin{cases} 0 & \text{Si } h < 0 \\ K_{\text{Sat}} \frac{dh}{dz} & \text{Si } h \geq 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

5.3. Proceso de Evaporación

Debido a incoherencias en los balances de agua y falta de ajuste de los caudales de salida de cada una de las columnas, se probaron dos formas de compensar dicho efecto, utilizando factores de evaporación para los volúmenes entrantes por la parte superior e inferior de cada columna, que tenderían a explicar dichos errores.

El proceso de evaporación se realizó utilizando los valores medios mensuales para Santiago de la estación meteorológica Cerro Calán, los cuales se presentan en la Figura 5.2. Se aprecia que existen valores máximos de evaporación para los meses de verano, con un máximo de 199 [mm/mes] para el mes de enero. También se observa que para los meses de invierno se producen los valores mínimos de evaporación, con 32 [mm/mes] en el mes de julio.



La evaporación utilizada se modeló de la siguiente manera:

$$E_i^m = \beta \cdot E_{\text{Cerro Calan}, i}^m \quad (5.2)$$

donde:

- E_i^m : Volumen de evaporación en el mes m entre el tiempo i-1 e i
- β : Coeficiente de evaporación entre 0 y 1.
- $E_{\text{Cerro Calan}, i}^m$: Evaporación mensual estación Cerro Calan para mes m entre el tiempo i-1 e i.

Se apreció que debido a las condiciones constructivas de cada una de las columnas y la forma de operarlas (cambio de piezas de la columna, colocación de bolsas plásticas arriba de la

columna para evitar evaporación, diferentes receptáculos de lixiviados, etc.), este factor de evaporación fue diferente para cada columna (dentro de un rango acotado de variación), con la salvedad de que debiesen ser menores o a lo más iguales al valor de evaporación promedio de cerro Calan, ya que las columnas estaban ubicadas a la sombra.

Otra de las consideraciones que se realizó, es que el porcentaje de evaporación es constante para todos los meses del año. Además, se consideró un área promedio de 5 centímetros de diámetro donde se produce la evaporación de los lixiviados, la cual corresponde al diámetro promedio del receptáculo que recibe los lixiviados a la salida de la columna y al diámetro de la cámara de carga de lixiviado en la columna.

En el caso del sistema superior, lo que puede evaporar es solo un porcentaje del volumen que infiltra en el tiempo Δt , por lo que la condición general de evaporación queda dada por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para } t = 0 \quad VV_{\text{Entra Columna}}^0 = 0 \quad (5.3)$$

$$\text{Para } t = 1 \quad VV_{\text{Entra Columna}}^1 = VV_{\text{Entra Columna}}^0 + (V_{\text{Entra Columna}}^1 - E_1^m) \quad (5.4)$$

$$\text{Para } t = j \quad VV_{\text{Entra Columna}}^j = VV_{\text{Entra Columna}}^{j-1} + (V_{\text{Entra Columna}}^j - E_j^m) \quad (5.5)$$

$$\text{Para } t = n \quad VV_{\text{Entra Columna}}^n = \sum_{i=0}^n V_{\text{Entra Columna}}^i - \sum_{i=0}^n E_i^m \quad (5.6)$$

donde:

- $VV_{\text{Entra Columna}}^i$: Volumen de lixiviado evaporado acumulado que entra a la columna entre el tiempo $i-1$ e i .
- $V_{\text{Entra Columna}}^i$: Volumen que entra a la columna medido en terreno entre el tiempo $i-1$ e i .
- E_i^m : Volumen de evaporación en el mes m entre el tiempo $i-1$ e i

A las ecuaciones anteriores hay que añadir la siguiente condición, que asegura una evaporación máxima solo igual al volumen que entra a la columna en el intervalo de medición:

$$\text{Si } (V_{\text{Entra Columna}}^i < E_{\text{Mes } i}^m) \begin{cases} \text{Verdadero} & \Rightarrow VV_{\text{Entra Columna}}^{i-1} \\ \text{Falso} & \Rightarrow V_{\text{Entra Columna}}^i + VV_{\text{Entra Columna}}^i - E_i^m \end{cases} \quad (5.7)$$

En el caso de los lixiviados que salen de la columna, las ecuaciones que gobiernan el fenómeno son muy parecidas a las anteriores y son las siguientes:

$$\text{Para } t = 0 \quad VV_{\text{Sale Columna}}^0 = 0 \quad (5.8)$$

$$\text{Para } t = 1 \quad VV_{\text{Sale Columna}}^1 = VV_{\text{Sale Columna}}^0 + (V_{\text{Sale Columna}}^1 - E_1^m) \quad (5.9)$$

$$\text{Para } t = j \quad VV_{\text{Sale Columna}}^j = VV_{\text{Sale Columna}}^{j-1} + (V_{\text{Sale Columna}}^j - E_j^m) \quad (5.10)$$

$$\text{Para } t = n \quad VV_{\text{Sale Columna}}^n = \sum_{i=0}^n V_{\text{Sale Columna}}^i - \sum_{i=0}^n E_i^m \quad (5.11)$$

donde:

$VV_{\text{Sale Columna}}^i$: Volumen de lixiviado evaporado acumulado que sale de la columna del proceso de modelación entre el tiempo $i-1$ e i .

$V_{\text{Sale Columna}}^i$: Volumen de lixiviado saliente del modelo entre el mes $i-1$ e i .

E_i^m : Volumen de evaporación en el mes m entre el mes $i-1$ e i

Uno de los supuestos efectuados para la modelación del proceso de evaporación, fue que el líquido lixiviado saliente de la columna se retira al final de cada Δt en el proceso de modelación, evaporando solamente ese ΔV saliente. Luego, lo que resta del proceso de evaporación se acumula. Llevando este supuesto al plano experimental, representa el retiro semanal del líquido lixiviado de los receptáculos. Lo anterior nos obliga a añadir las siguientes condiciones a las ecuaciones de evaporación para un tiempo i cualquiera:

$$\text{Si } (V_{\text{Sale Columna}}^i < E_i^m) \left\{ \begin{array}{l} \text{Verdadero} \Rightarrow VV_{\text{Sale Columna}}^{i-1} \\ \text{Falso} \Rightarrow V_{\text{Sale Columna}}^i + VV_{\text{Sale Columna}}^i - E_i^m \end{array} \right. \quad (5.12)$$

Luego, teniendo en cuenta todos los supuestos antes señalados, se procedió a realizar el proceso de calibración o ajuste de las principales variables que controlan el flujo en la zona no saturada.

5.4. Ajuste de Parámetros de Curvas de Retención

El punto de partida para solucionar las ecuaciones de Richards, fue estimar las curvas de succión características para cada uno de los suelos experimentados. Esto se llevó a cabo utilizando los diferentes datos de laboratorio y los perfiles de humedad que se dispone de cada una de las columnas rotas. Esto se compatibilizó eligiendo un modelo clásico de curva de succión.

Los puntos presentados a continuación tienen por finalidad explicar y presentar el proceso de calibración de los parámetros de las curvas de succión.

5.4.1. Proceso de Ajuste

Para el ajuste de los modelos de curvas de retención, se cuenta con cinco puntos experimentales de laboratorio, que barren una amplia gama de succiones, como lo son: 0.3,

0.6, 1.0, 5.0 y 15 atmósferas. Consideramos que con la cantidad de datos que se tienen son representativos de las características del suelo, ya sea a pequeñas succiones, como a grandes succiones.

Para el proceso de ajuste de las curvas de retención, se procedió a analizar dos enfoques alternativos.

El primero correspondió a la utilización del programa RETC (RETencion Curve), diseñado para ajustar varios modelos analíticos, tales como: Van Genuchten (1980), Brooks and Corey (1964) y Burdine (1953) a datos observados de laboratorio, o estimar en función de porcentajes de arcillas, arenas y limos, los diferentes parámetros de los modelos, utilizando bases de datos de curvas de retención. Este modelo cuenta, en el caso de ajuste de parámetros a datos reales, con un paquete de optimización automático.

La segunda forma, corresponde a la optimización múltiple, utilizando un esquema de mínimos cuadrados, el cual se implementó utilizando el programa SOLVER.

Al evaluar las dos alternativas de ajuste, se consideró que la segunda es la que mejor se adecua a nuestros requerimientos, ya que por su simplicidad y permitir un mayor grado libertad para variar los parámetros, nos permitiría obtener mejores resultados del proceso de calibración de flujo en la zona no saturada.

El modelo de curva de retención utilizada correspondió al de Van Genuchten de $m = 1-1/n$, el cual se puede observar en la ecuación (5.13)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n\right]^m} & h < 0 \\ \theta_{sat} & h \geq 0 \end{cases} \quad (5.13)$$

donde:

- θ_{sat} : Contenido volumétrico saturado de agua, equivalente a la porosidad del suelo [L^3/L^3].
- θ_{res} : Contenido volumétrico residual de agua, corresponde a la humedad del suelo para un nivel mínimo de presión interna [L^3/L^3].
- m : $1-1/n$, donde n es un parámetro empírico
- α : Factor de escala [$1/L$].

Con los puntos experimentales de laboratorio (humedad versus succión) se procedió a la calibración de los siguientes parámetros θ_r , θ_s , α , n y m . El criterio fue minimizar la siguiente función objetivo:

$$FO = \sum_{i=1}^5 (\theta_{Simulado}^i - \theta_{Observado}^i)^2 \quad (5.14)$$

La función objetivo se optimizó sujeto a una serie de condiciones, dentro de las cuales se cuentan:

$$\theta_{\text{Res}} > 0 \quad (5.15)$$

$$\theta_{\text{Res}} < \theta_{\text{Sat}} \quad (5.16)$$

Así mismo, se verificó que los valores de θ_{Res} , θ_{Sat} , α y n estuviesen dentro de los rangos existentes en la literatura (Tabla 5.1).

Además, uno de los parámetros que nos permitió discernir acerca de la capacidad de acumulación inicial de agua, correspondió a la porosidad total teórica presente en el suelo, que queda representada por la siguiente ecuación:

$$\Delta\theta_{\text{Total}}^{\text{Teórica}} = \theta_{\text{Saturado}} - \theta_{\text{Residual}} \quad (5.17)$$

Pero sólo parte de la porosidad total es la que se aprovecha para la acumulación de agua por parte del suelo o capacidad buffer frente a las infiltraciones, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta\theta_{\text{Real}}^{\text{Teórica}} = \theta_{\text{Saturado}} - \theta_{\text{Inicial}} \quad (5.18)$$

Esta capacidad buffer es la que permite de algún modo, en conjunto con la permeabilidad del suelo, amortiguar los “ondas” de infiltración que se producen durante las lluvias o ante las variaciones de nivel en un sistema de infiltración, y producir un desfase entre el caudal entrante y saliente en un volumen de control fijo.

5.4.2. Datos Ajustados

El proceso de ajuste de los parámetros fue iterativo, ya que fue el resultado de obtener los mejores ajustes del problema de flujo y perfiles de humedad por parte de la modelación numérica. También se consideró que el rango de variación de los datos, estuviese dentro de los valores que nombra la literatura para la descripción de clase del suelo. En la Tabla 5.1, se presentan los valores típicos de las curvas de retención que utiliza el software Roseta de predicción de parámetros de curvas de retención (Schaap, 1999) utilizando el modelo de Van Genuchten de $m = 1-1/n$ parámetros. Donde N representa el número de curvas de retención que se tomaron para la estimación de los valores promedios de cada uno de los parámetros planteados.

Al realizar el proceso de ajuste, tomando las consideraciones los criterios antes señalados, los valores obtenidos para los diferentes parámetros, se pueden observar en la Tabla 5.2. Además, se presenta como parámetro de calidad de ajuste el coeficiente de correlación. Se puede observar que los valores alcanzados por el coeficiente de correlación son bastante altos, lo que indica el buen ajuste de parte del modelo de curva de succión a los datos medidos de laboratorio.

Tabla 5.1
Valores Medios de Diferentes Parámetros de Curvas de Retención

Clase Por Textura	N	θ_r [cm ³ /cm ³]	θ_s [cm ³ /cm ³]	α [1/cm]	n	K_s Log(cm/día)
Arcilla	84	0.098	0.459	0.015	1.253	1.169
Arcilla Marga	140	0.079	0.442	0.016	1.416	0.913
Marga	242	0.061	0.399	0.011	1.472	1.081
Marga arenosa	201	0.049	0.390	0.035	1.746	2.022
Arena	308	0.053	0.375	0.035	3.177	2.808
Arena arcillosa	11	0.117	0.385	0.033	1.208	1.055
Arena arenosa margosa	87	0.063	0.384	0.021	1.330	1.120
Arena margosa	476	0.039	0.387	0.027	1.449	1.583
Limo	6	0.050	0.489	0.007	1.679	1.641
Limo arcilloso	28	0.111	0.481	0.016	1.321	0.983
Limo arcilloso margoso	172	0.090	0.482	0.008	1.521	1.046
Limo margoso	330	0.065	0.439	0.005	1.663	1.261

Fuente: Scaap, 1999.

Tabla 5.2
Ajustes Parámetros de modelo de Van Genuchten de $m = 1-1/n$
Diferentes Suelos

Tipo de Suelo	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
Parámetro								
θ_r [cm ³ /cm ³]	0.045	0.073	0.006	0.200	0.020	0.010	0.018	0.085
θ_s [cm ³ /cm ³]	0.290	0.363	0.180	0.600	0.224	0.450	0.250	0.450
α [1/cm]	0.050	0.150	0.082	0.276	0.180	0.085	0.054	0.008
n [-]	1.253	1.250	1.435	1.320	1.200	1.184	1.311	1.258
m [-]	0.202	0.200	0.303	0.242	0.167	0.156	0.237	0.205
Coefficiente de Correlación	98.02%	98.82%	97.50%	99.78%	98.31%	99.53%	98.36%	99.45%

En las Figuras 5.3 a 5.10 se pueden observar los datos medidos y ajustados para cada uno de los suelos estudiados. Al observar las figuras y los indicadores de ajuste, nos damos cuenta de la buena calidad de la solución obtenida en la mayoría de los casos.

Figura 5.3
Ajuste Modelo Van Genuchten $m = 1-1/n$
Suelo S₁

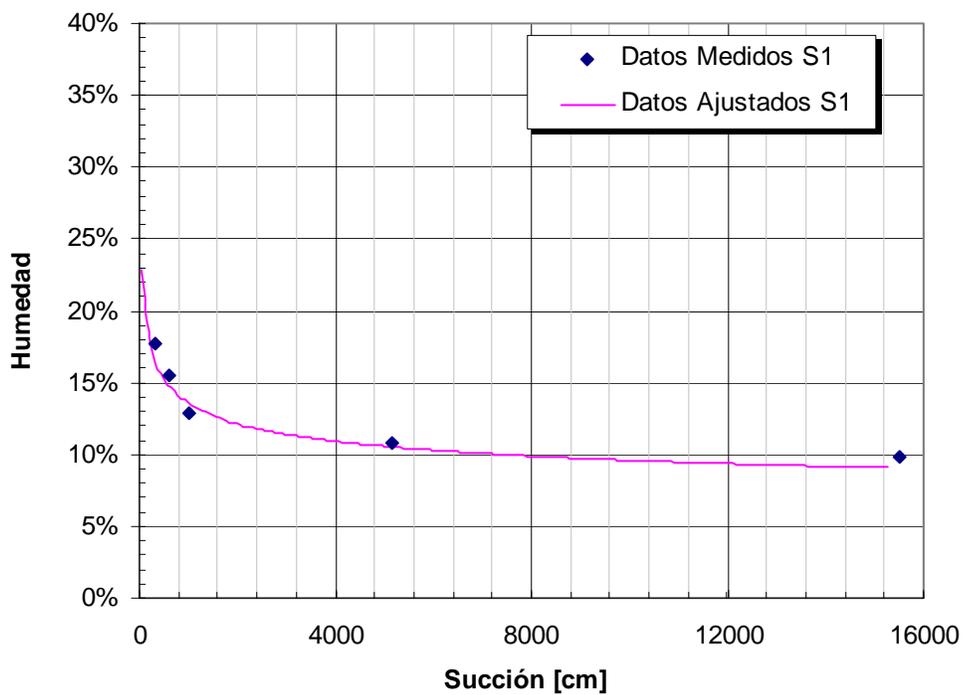


Figura 5.4
Ajuste Modelo Van Genuchten $m = 1-1/n$
Suelo S₂

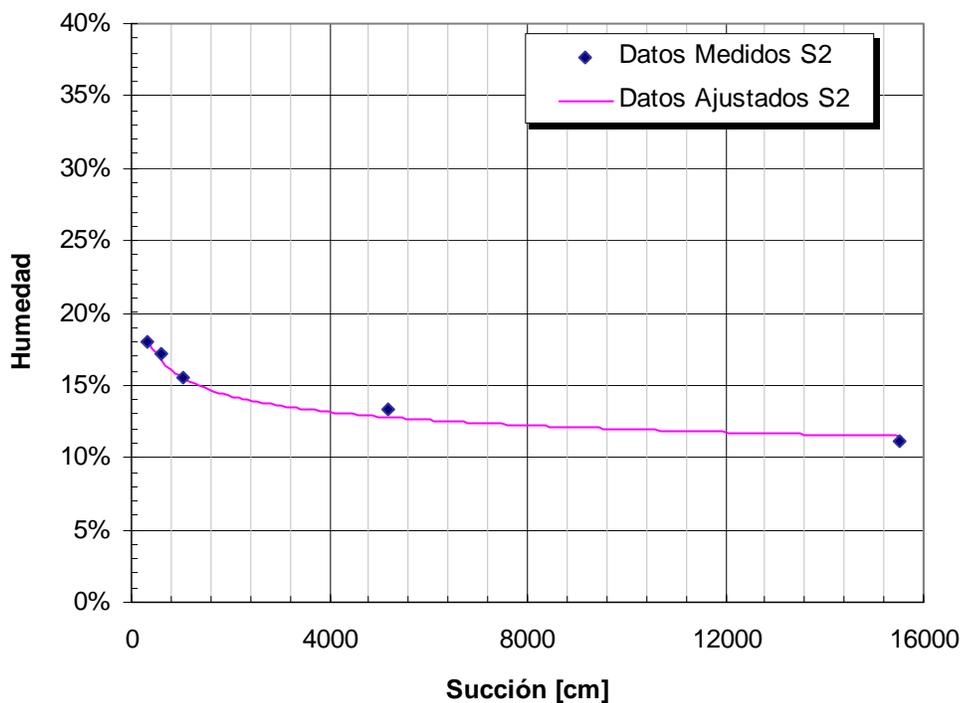


Figura 5.5
Ajuste Modelo Van Genuchten $m = 1-1/n$
Suelo S₃

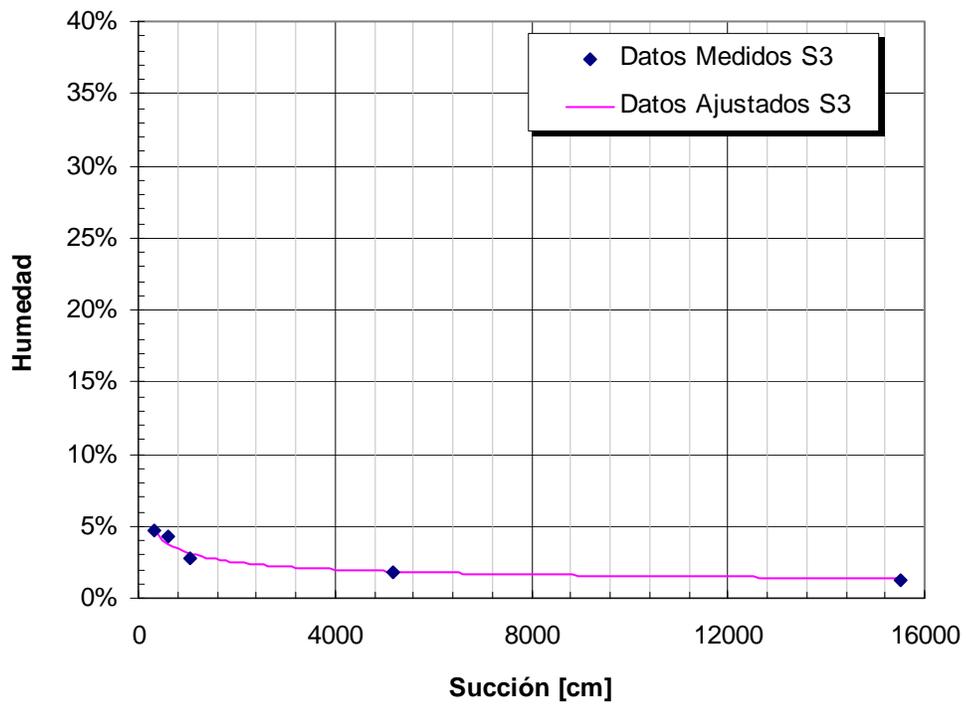


Figura 5.6
Ajuste Modelo Van Genuchten $m = 1-1/n$
Suelo S₄

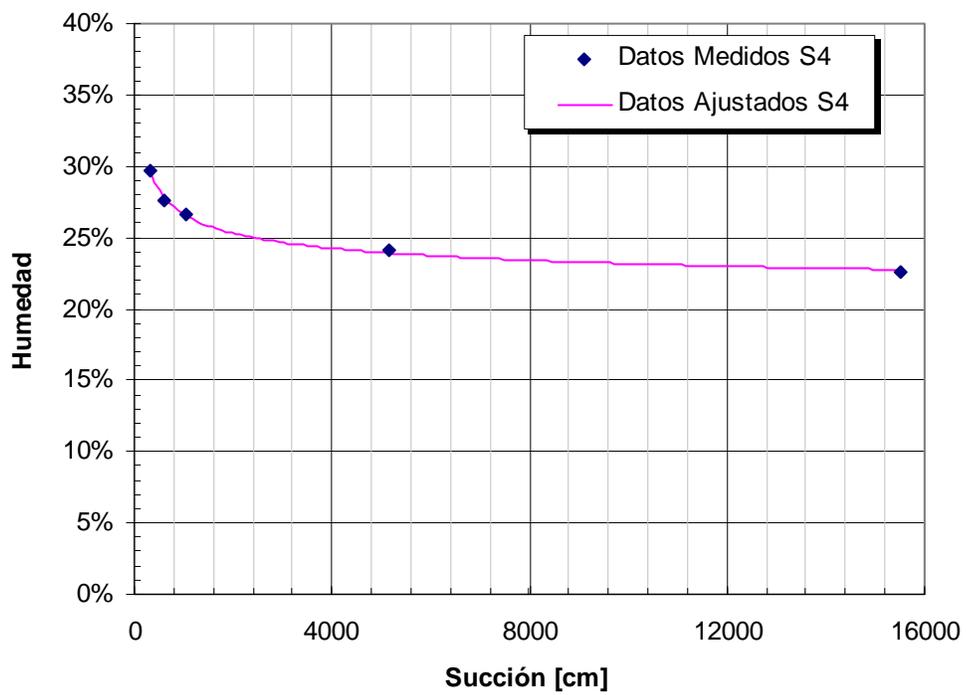


Figura 5.7
Ajuste Modelo Van Genuchten $m = 1-1/n$
Suelo S₅

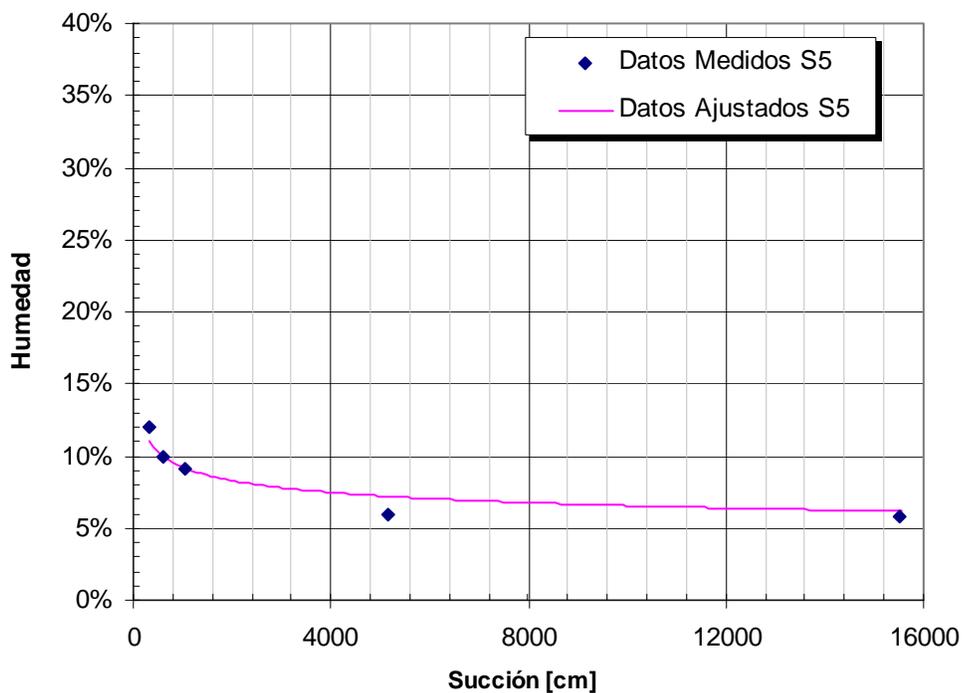


Figura 5.8
Ajuste Modelo Van Genuchten $m = 1-1/n$
Suelo S₆

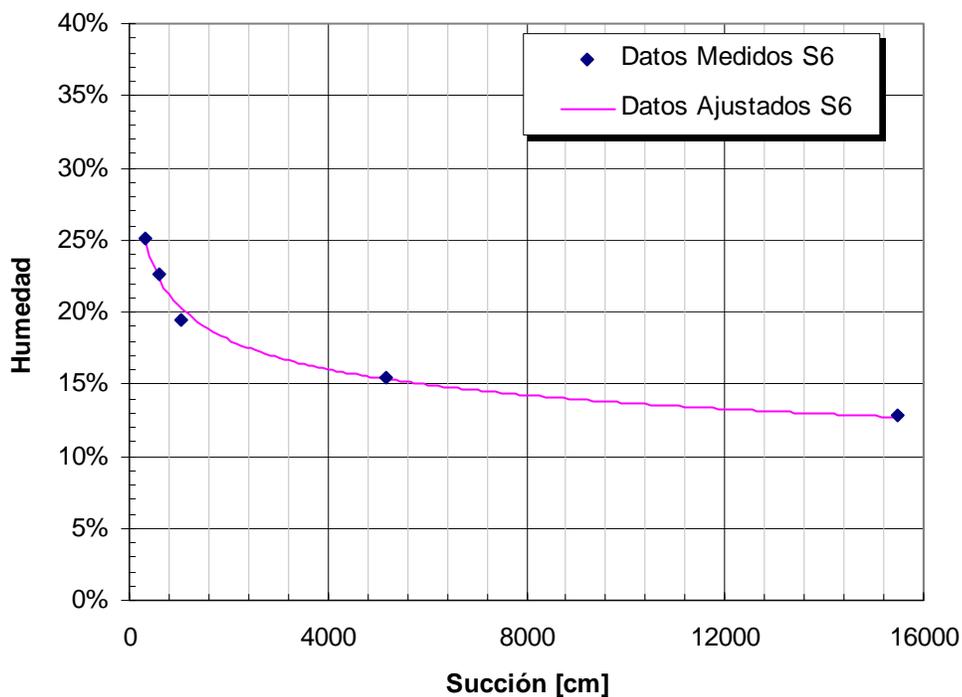


Figura 5.9
Ajuste Modelo Van Genuchten $m = 1-1/n$
Suelo S₇

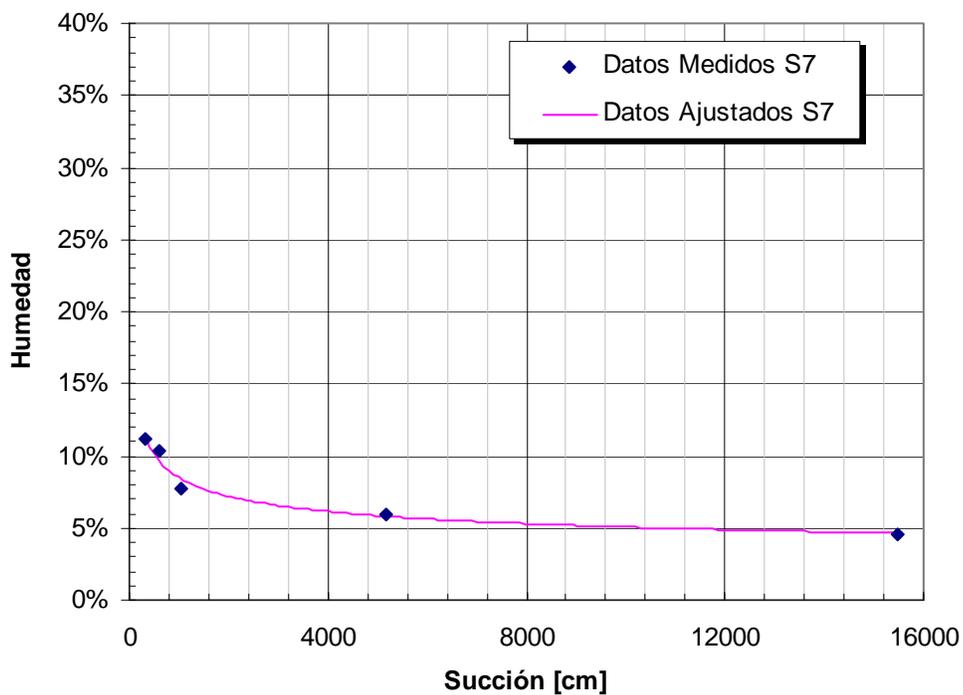
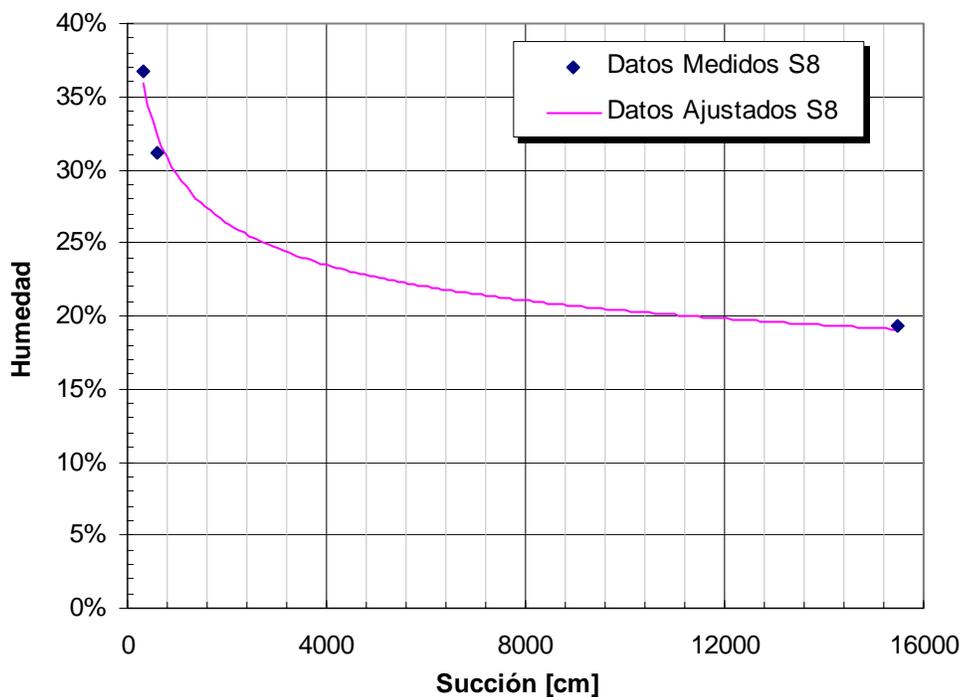
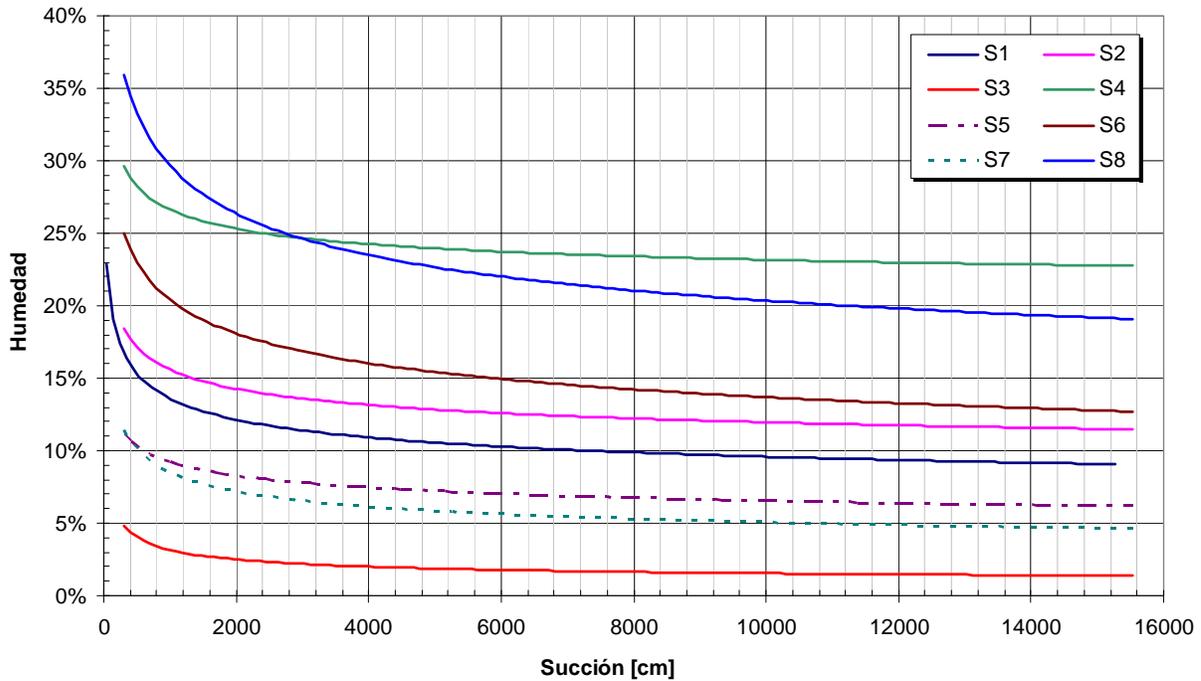


Figura 5.10
Ajuste Modelo Van Genuchten $m = 1-1/n$
Suelo S₈



En la Figura 5.11, se puede observar la totalidad de las curvas de succión ajustadas. Realizando un pequeño análisis, se puede decir que el suelo 3 (arenas) a muy bajas succiones, entrega la totalidad del agua almacenada en sus poros, a diferencia del suelo 8 (Cerrillos + Arena + bentonita), que corresponde a un suelo arcilloso, que necesita una elevada succión para entregar el agua retenida en sus poros. Todo lo anterior valida, en el sentido físico, las curvas ajustadas.

Figura 5.11
Curvas de Succión Ajustadas
Humedad Versus Succión



Al estudiar las ecuaciones (5.16) y (5.17) y calcular sus valores (ver Tabla 5.3), nos damos cuenta que los parámetros ajustados representan de alguna manera lo que sucede en la realidad.

Tabla 5.3
Valores Humedad Potencial y Real Teórica de cada uno de los Suelos (%)

Tipo de Suelo	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
$\theta_{\text{Total}}^{\text{Teórico}}$	24.5%	29.0%	17.4%	40.0%	20.4%	44.0%	23.2%	36.5%
$\theta_{\text{Real}}^{\text{Teórico}}$	23.5%	24.6%	8.1%	16.3%	15.4%	28.4%	14.6%	36.5%

Uno de los casos más representativos, corresponde al Suelo 4, definido como una tierra de hoja, el cual posee un alto nivel retención de agua. En términos numéricos queda reflejado por un alto $\theta_{\text{Total}}^{\text{Teórico}}$. Sumado a este el suelo 6, que corresponde a una mezcla de una arcilla arenosa con la tierra de hoja en proporciones iguales de 50%, también presenta un alto grado adsorción

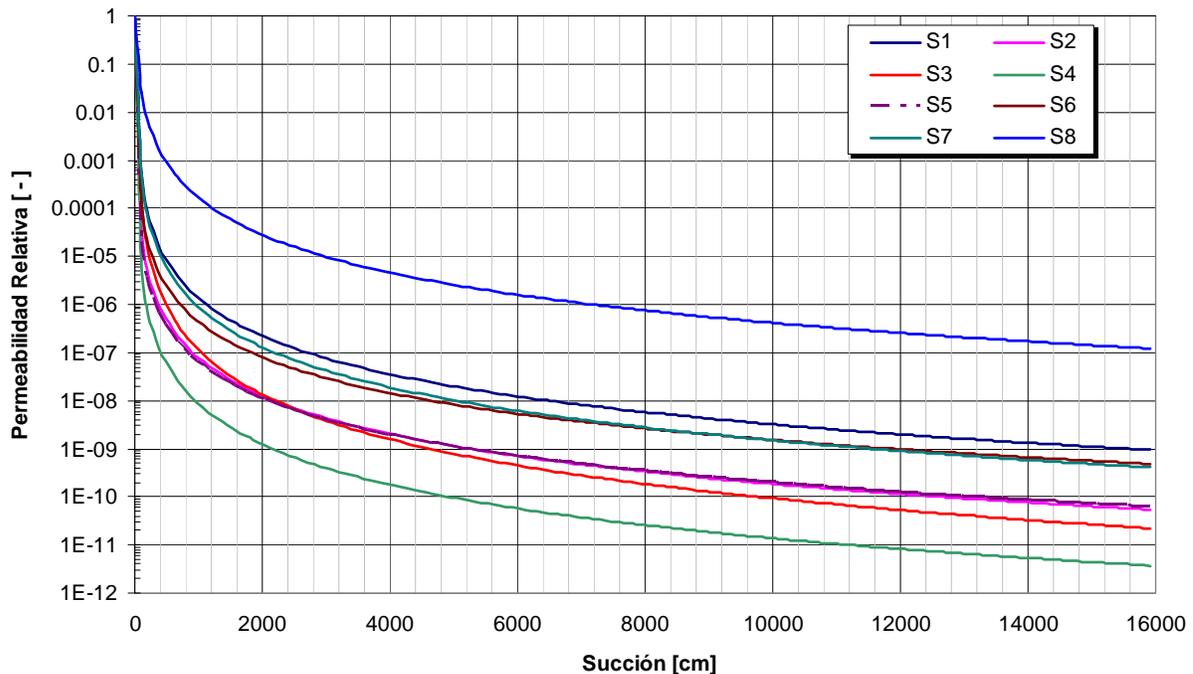
o acumulación de agua. Lo que no quiere decir que el agua sea de fácil entrega, como en el caso de las arenas, donde el agua que se acumula, frente a pequeñas succiones es entregada o liberada.

Luego, al tener el ajuste de los parámetros de la curva θ v/s h , podemos estimar la curva K_{rel} v/s h . El modelo utilizado corresponde a Van Genuchten $m = 1-1/n$ (ecuación (5.19)).

$$K_{Relativa}(h) = \begin{cases} \frac{\left[1 - (\alpha \cdot |h|)^{(n-1)} \left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n\right]^{-m}\right]^2}{\left[1 + (\alpha \cdot |h|)^n\right]^{\frac{m}{2}}} & \text{para } h < 0 \\ 1 & \text{para } h \geq 0 \end{cases} \quad (5.19)$$

Con el fin de comparar las formas de cada una de las curvas, en la Figura 5.12 se presenta el gráfico K_{rel} v/s h , donde la permeabilidad relativa tiene un valor $K_{rel} = 1$, para $h = 0$, lo que hace comparable, la forma de cada una de curvas. Para obtener, la forma definitiva de las curvas de K absoluta v/s h , se pondera el $K_{Relativa}$ por $K_{Absoluta}$.

Figura 5.12
Curva Permeabilidad Relativa Versus Succión



Para la modelación numérica definitiva de las columnas, se utilizó una permeabilidad homogénea a lo largo de cada estrato de suelo modelado, despreciando los efectos de colmatación en el medio poroso.

5.5. Antecedentes Generales Proceso de Calibración, Validación y Proyección

A continuación se describe en forma detallada los diferentes pasos seguidos en el proceso de calibración, validación y proyección del comportamiento de cada una de las columnas modeladas. Se presentan los criterios, supuestos realizados, datos disponibles, tiempos de modelación, discretizaciones y resultados.

Los procesos fueron los siguientes:

- a. **Calibración:** Este punto está relacionado con la estimación de las principales variables de flujo involucradas en la modelación de la zona no saturada. Los datos utilizados para este propósito fueron: volumen de lixiviado entrante y saliente de cada columna, perfil de humedad de columna rota y evaporación de referencia de Santiago (Cerro Calán). Las columnas rotas corresponden a: S₁B, S₂B, S₃A, S₃B, S₄B, S₅A, S₆A, S₇A y S₈A.

En base a la minimización de los errores entre las curvas de volúmenes acumulados observados y simulados, junto con los perfiles de humedad observados y simulados para cada una de las columnas rotas, se calibraron los parámetros de flujo. El tiempo de modelación correspondió al tiempo final donde se rompió la columna de calibración.

Con los parámetros ya calibrados, se observó el comportamiento de la columna no rota (del mismo material) en cuanto a volúmenes salientes. Esto se realizó para el mismo tiempo de modelación de la columna rota.

- b. **Validación:** El objetivo de este punto consiste en ratificar los parámetros calibrados en el proceso anterior, para la columna no rota. En la mayoría de los casos, el comportamiento hidráulico en la instalación experimental de las dos columnas construidas fue similar, por lo que los parámetros de flujo empleados entre las dos columnas fueron los mismos. Por lo tanto se emplearon los mismos parámetros de la columna de calibración, en la columna no roto, pero para un tiempo mayor a los de calibración.
- c. **Proyección:** En que las columnas que no salió lixiviado (por la parte inferior), en el tiempo en que se desarrollaron las experiencias, se calibró solamente los parámetros de flujo en función de los perfiles de humedad y el volumen de lixiviado entrante. Luego, se procedió a simular el tiempo en que el líquido lixiviado que “probablemente” atravesaría la columna de suelo experimental. Para cumplir con lo anterior, se desarrolló un modelo matemático de estimación de las tasas de infiltración, el cual incorporó los fenómenos de colmatación del medio poroso.

Para la realización de los procesos antes señalados, se utilizó el modelo numérico HYDRUS1D (J. Šimůnek, M. Šejna and M. Th. Van Genuchten), que fue diseñado para analizar el flujo de agua, calor y solutos en medios porosos no saturados, parcialmente saturados y completamente saturados.

5.5.1. Discretizaciones Espaciales y Temporales

La utilización del modelo HYDRUS 1D para la simulación unidimensional del flujo a través de los diferentes suelos estudiados, requiere ajustar las discretizaciones espaciales y temporales a valores que permitan obtener soluciones satisfactorias del problema de calibración. La solución del problema de flujo en medios porosos no saturados es no lineal, lo que hace que la solución numérica se vea fuertemente afectada por los valores y la relación existentes entre las discretizaciones espaciales y temporales. En el caso de la validación y la proyección, se mantuvieron las discretizaciones temporales y espaciales, variando solamente los tiempos finales de modelación.

El modelo HYDRUS 1D introduce tres discretizaciones de tiempos asociada a la solución numérica del problema de flujo y transporte. La primera discretización (Δt), corresponde a la que utiliza el modelo para comenzar a iterar. Luego, Δt es automáticamente ajustada de acuerdo a las siguientes reglas (Mls, Šimůnek et al, 1992):

- La discretización Δt debe coincidir con los valores Δt_{\min} y Δt_{\max} .
- Los incrementos del tiempo no deben ser menores que Δt_{\min} y mayores que Δt_{\max} , es decir debe cumplirse que $\Delta t_{\min} < \Delta t < \Delta t_{\max}$.
- Si durante un paso de tiempo particular, el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia es ≤ 3 , el incremento de tiempo para el siguiente paso se hace considerando un múltiplo de Δt , por una constante predeterminada > 1 (usualmente entre 1.1 y 1.5). Ahora si, el número de iteraciones es ≥ 7 , el Δt es multiplicado por una constante menor que 1 (usualmente entre 0.3 y 0.9).
- Si durante un paso de tiempo particular, el número de iteraciones de cualquier tiempo comienza a ser más grande que un máximo predefinido (usualmente entre 10 y 50), el proceso de iteración es terminado. Luego, los pasos de tiempo son vueltos a $\Delta t/3$ y el proceso de iteración es comenzado nuevamente.

La selección de la discretización óptima, Δt , es también influenciado por el esquema de solución de transporte de contaminantes. En el presente estudio, se modeló solamente el problema de flujo.

El criterio utilizado para la elección de la discretización del tiempo fue el que nos permitiese obtener valores simulados coherentes con la realidad en un tiempo razonable. Cabe señalar que para la elección de cada uno de los Δt , se realizó un análisis de sensibilidad que tendía a ver como variaba la solución frente a pequeñas variaciones del Δt .

El criterio utilizado para obtener la discretización Δx , correspondió a un análisis de sensibilidad que consideró la menor discretización, tal que la solución entregada por el modelo, frente a una discretización un epsilon ϵ más pequeña, no variase las funciones objetivos, forma de las curvas de salidas de lixiviado o perfiles de humedad simulados. Se utilizó una sola discretización espacial para todas las columnas.

En la Tabla 5.4 se presentan los principales valores de las discretizaciones espaciales y temporales de las diferentes columnas modeladas.

Tabla 5.4
Valores Utilizados Discretización Espacial (Δx) y Temporal (Δt)

Suelo	Columna	Largo [cm]	Δx [cm]	N° Capas	Δh Capa 1 [cm]	Δh Capa 2 [cm]	Δt [hr]	Δt_{Min} [hr]	Δt_{Max} [hr]
S ₁	A	102	1	2	2	100	0.50	0.0050	2
S ₁	B	102	1	2	2	100	0.50	0.0050	2
S ₂	A	102	1	2	2	100	0.50	0.0050	2
S ₂	B	102	1	2	2	100	0.50	0.0050	2
S ₃	A	102	1	2	2	100	0.25	0.0025	1
S ₃	B	102	1	2	2	100	0.25	0.0025	1
S ₄	A	102	1	2	2	100	-	-	-
S ₄	B	102	1	2	2	100	0.20	0.0020	3
S ₅	A	102	1	2	2	100	0.10	0.0020	2
S ₅	B	102	1	2	2	100	0.10	0.0020	2
S ₆	A	102	1	2	2	100	0.10	0.0050	2
S ₆	B	102	1	2	2	100	0.10	0.0050	2
S ₇	A	102	1	2	2	100	0.25	0.0050	2
S ₇	B	102	1	2	2	100	0.25	0.0050	2
S ₈	A	102	1	2	2	100	0.05	0.0100	1
S ₈	B	102	1	2	2	100	0.05	0.0100	1

5.5.2. Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales utilizadas en el modelo (ver Tabla 5.5), para los procesos de calibración, validación y proyección, reflejaron en la mayoría de los casos las situaciones constructivas de las columnas, en cuanto a la humedad y carga de líquido lixiviado.

Tabla 5.5
Valores Humedad Medido y Humedad Utilizada en el Modelo

Suelo	Columna	θ_{Modelo}
S ₁	A y B	5.5%
S ₂	A y B	11.7%
S ₃	A y B	10.0%
S ₄	A y B	43.7%
S ₅	A y B	6.9%
S ₆	A y B	16.6%
S ₇	A y B	10.4%
S ₈	A y B	8.5%

5.5.3. Tiempos Calibración, Validación y Proyección

Como se dijo anteriormente, a cada tipo de suelo se le construyeron dos columnas, igualando dentro de lo posible las condiciones constructivas tales como densidad, humedad inicial y ancho de las capas. Este esquema nos permitió romper una columna y generar perfiles de humedad y calibrar las curvas de succión y estimar de mejor forma la permeabilidad del sistema.

Además, si el comportamiento de la columna vecina seguía las mismas tendencias, en cuanto a caudales entrantes y salientes que la columna que Si se rompió, se utilizaría el dato de perfiles de humedad (de la columna que se rompió) como una referencia al momento de calibrar y/o verificar las humedades que se estarían desarrollando en la columna que No se rompió.

En la Tabla 5.6, se presentan los diferentes tiempos utilizados (calibración, validación y proyección), según corresponda y si la columna fue rota o no.

En la columna S₄A debido a su anómalo comportamiento en cuanto a volúmenes salientes y entrantes, no fue posible calibrar un modelo numérico de flujo, por lo que se optó por dejar de lado la columna.

En el caso de las columnas S₆A y S₆B, se optó por tiempos de calibración diferentes para ambos casos, debido al dispar comportamiento de los volúmenes entrantes y salientes, siendo la razón más probable la diferencia de armado. Debido a este hecho, el proceso de validación no se pudo llevar a cabo en la columna S₆B, ya que el tiempo de calibración corresponde al tiempo de toma de datos en la columna.

Tabla 5.6
Tiempos de Calibración

Suelo	Columna	Tiempo Calibración [días]	Tiempo Validación [días]	Tiempo Proyección [días]	Se Rompió
S ₁	A	492	632	-	No
S ₁	B	492		-	Si
S ₂	A	534	632	-	No
S ₂	B	534		-	Si
S ₃	A	485	611	-	No
S ₃	B	485		-	Si
S ₄	A	-		-	No
S ₄	B	520		-	Si
S ₅	A	492		-	Si
S ₅	B	492	632	-	No
S ₆	A	534		-	Si
S ₆	B	534	632	-	No
S ₇	A	485		-	Si
S ₇	B	485	632	-	No
S ₈	A	527		-	Si
S ₈	B	527	632	1003	No

5.6. Proceso de Calibración

El proceso de calibración de los parámetros de flujo se realizó en las columnas que se rompieron y se verificaron en las columnas pares que no se rompieron. Por tal razón, en los siguientes puntos se trabajará con pares de columnas.

En muchas de las curvas de volúmenes acumulados entrantes, se identificó la existencia de discontinuidades, lo que puede ser atribuido a errores de medición. Estos puntos fueron ubicados y corregidos, siguiendo la tendencia natural de las curvas acumuladas.

Cabe señalar, que el perfil de humedad de las columnas rotas, se supuso igual al perfil de la columna no rota. Esto es sólo referencial y se utilizó para tener un patrón de comparación entre las columnas.

5.6.1. Criterios Generales Utilizados para la Calibración

Los criterios generales utilizados al momento de la calibración de los parámetros de flujo fueron los siguientes:

- Si el comportamiento de los volúmenes entrantes y salientes de las columnas A y B de un suelo determinado eran similares, se utilizó la columna que se cortó para calibrar los parámetros de flujo (curva de succión y permeabilidades) en función de los volúmenes entrantes y salientes, junto con el perfil de humedad. Luego, con los parámetros ya calibrados en la columna rota, se impusieron dichos parámetros en la columna no rota. En este punto se validan de alguna forma los parámetros calibrados en el paso anterior.
- Si el comportamiento hidráulico de las columnas es muy diferente o la validación de los parámetros en la columna no rota (caso S₁A y S₁B) también lo son, se consideró realizar una calibración independiente de permeabilidad considerando la misma curva de succión.
- En el caso en que sólo existen datos puntuales de caudales de salida al principio del tiempo de operación de las columnas, se consideró que dichos caudales de salida correspondieron a volúmenes indeseados, que se produjeron debido a precipitaciones no controladas a las columnas. Este efecto se produjo principalmente debido a que el sistema de recolección final de lixiviados por la parte inferior de las columnas, solo se instaló tiempo aproximadamente 8 meses después de la puesta en marcha de las columnas, siendo el anteriormente utilizado muy precario. Este caso se produjo en las columnas S₂A, S₂B y S₈B.

A modo de ejemplo, se presenta el caso de la calibración de los parámetros de flujo de las columnas S₃A y S₃B, ya que los procedimientos de las demás columnas son similares. Todos los gráficos de calibración para el resto de las columnas se presentan en el Anexo 7.

5.6.2. Calibración Columna S₃A y S₃B

La columna rota corresponde a la S₃B y se utilizó para el proceso de calibración de la curva de succión. Debido al similar comportamiento presentado por ambas columnas (S₃A y S₃B) en cuanto a volúmenes entrantes y salientes (ver Figura 5.13), podemos decir que los parámetros hidráulicos calibrados en la columna S₃B son aplicables a la columna S₃A.

Tabla 5.7
Principales Resultados de Calibración Columna S₃A y S₃B

Col N°	θ_{Sup}	θ_{Inf}	K ₁ [cm/hr]	K ₂ [cm/hr]	Perfil Humedad	Volúmenes
					Coefficiente de Correlación	Coefficiente de Correlación
S ₃ A	2.5%	27.8%	0.025	1.000	99.31%	99.81%
S ₃ B	2.5%	22.9%	0.025	1.000	98.27%	99.94%

En las Figuras 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17 se presentan los datos observados, como puntos discontinuos (cuadrados, rombos y triángulos) y los datos simulados en líneas continuas. Como se puede observar en las Figuras 5.14 y 5.16, existe un buen ajuste en las curvas de volúmenes salientes observados y simulados, al igual que en las Figuras 5.15 y 5.16 que corresponden a los perfiles de humedad simulados y observados. El buen ajuste alcanzado por el modelo conceptual planteado, confirma la hipótesis de que la diferencia entre los caudales observados y los entregados por el modelo, sufrieron evaporaciones indeseadas en la instalación experimental.

Figura 5.13
Volúmenes Acumulados Columnas S₃A y S₃B

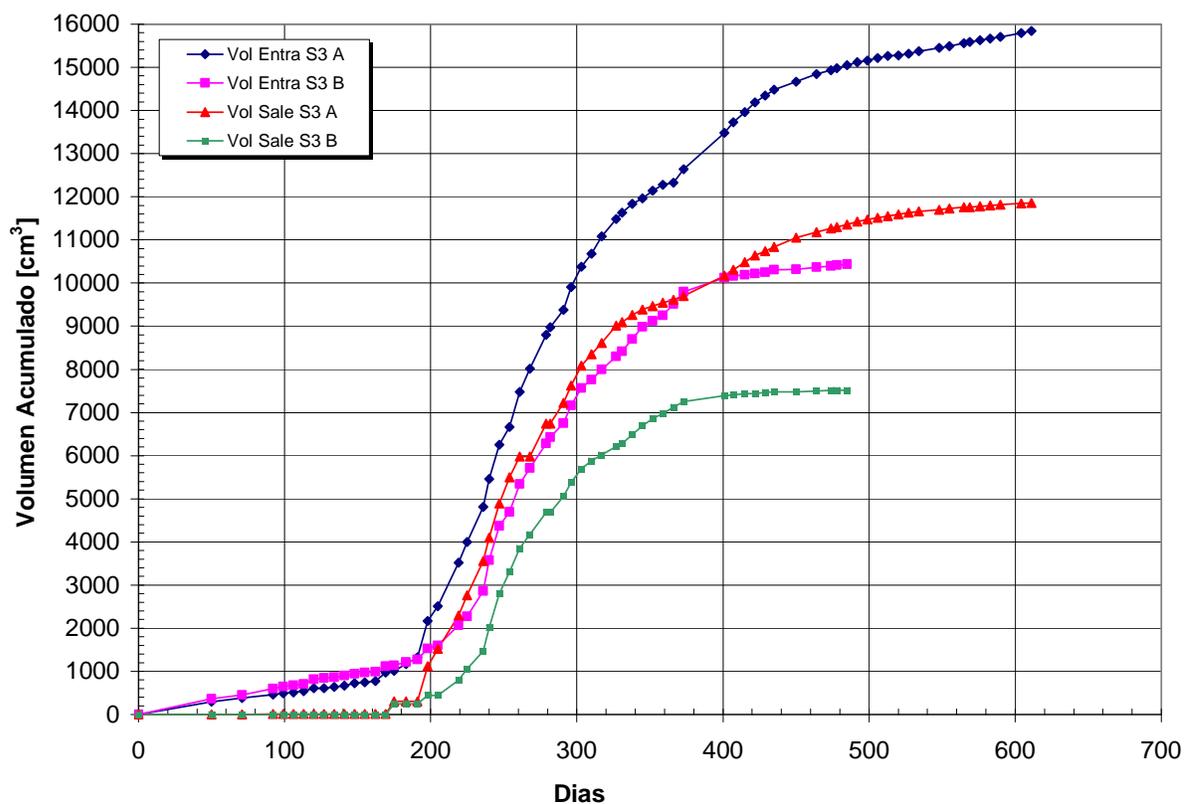


Figura 5.14
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₃A

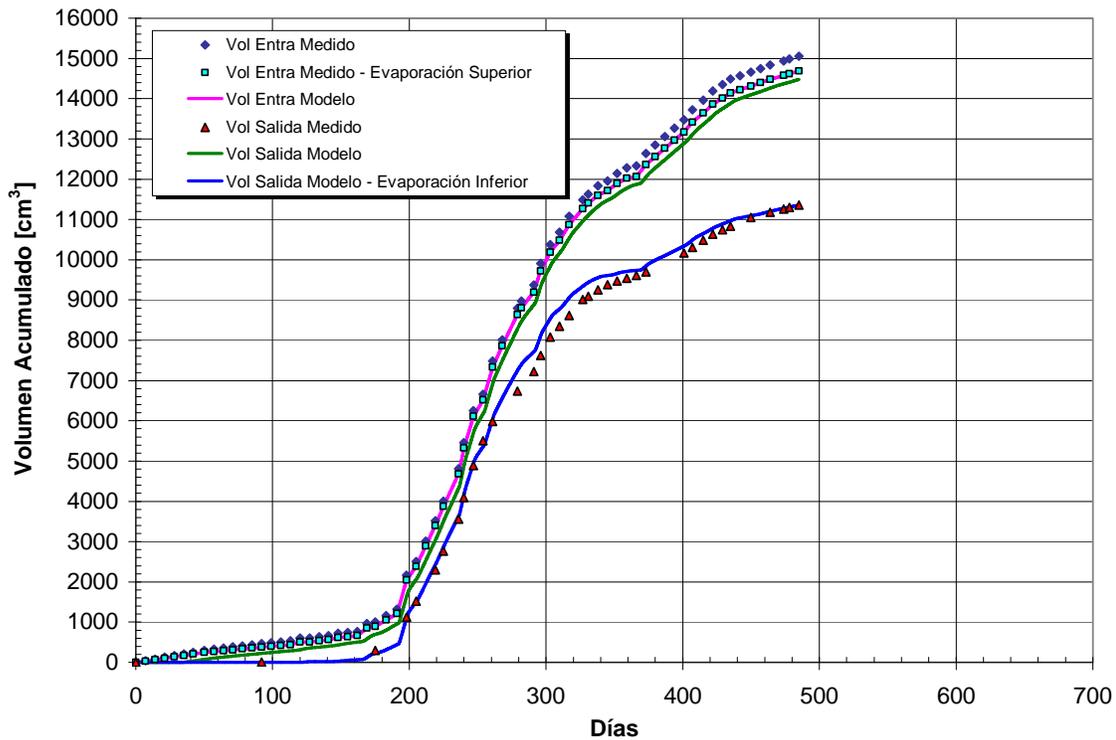


Figura 5.15
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₃B

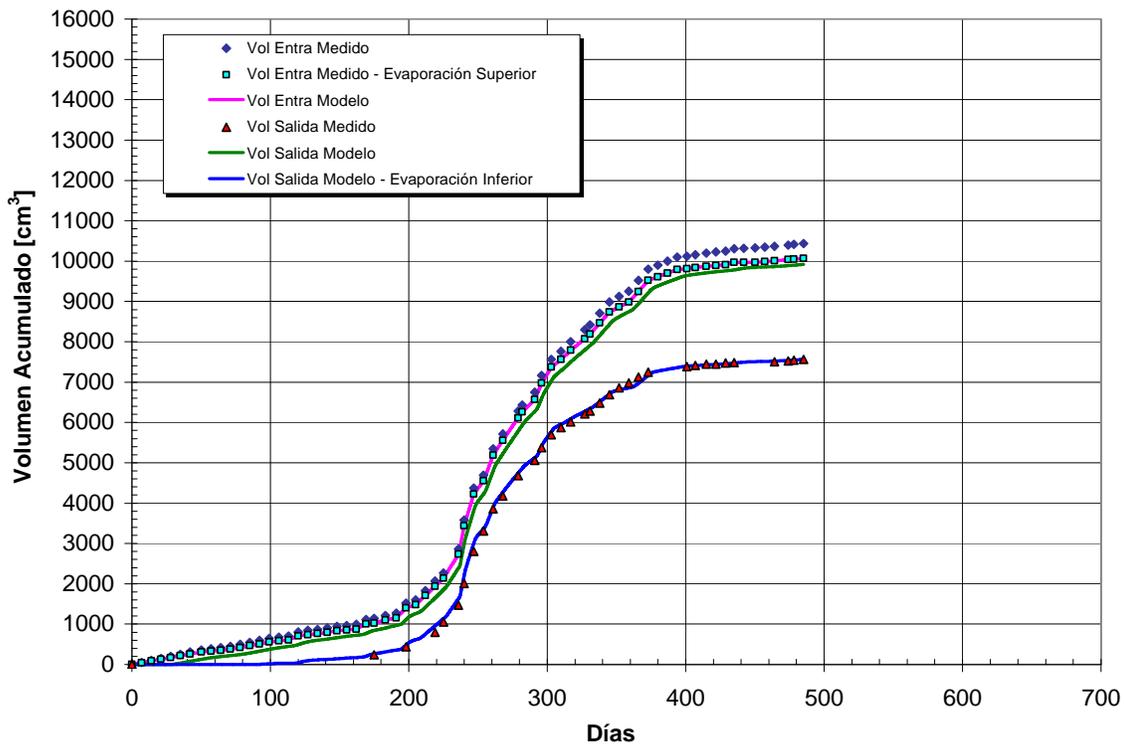


Figura 5.16
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₃A (Perfil de Referencia)

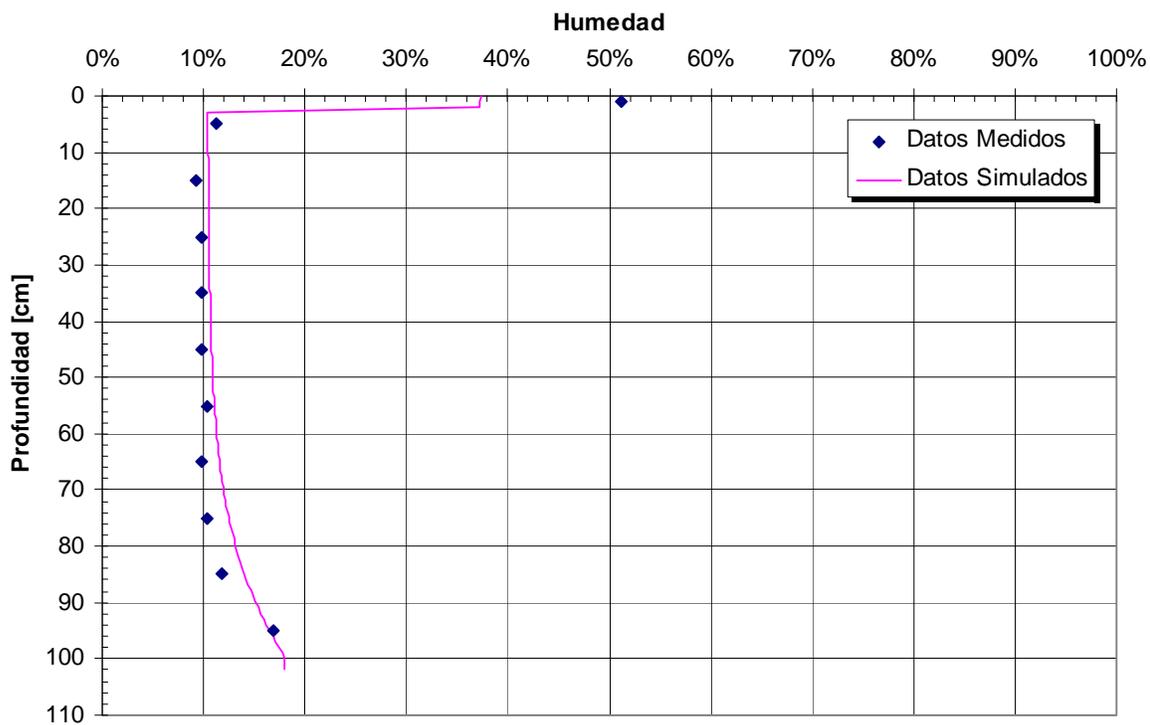
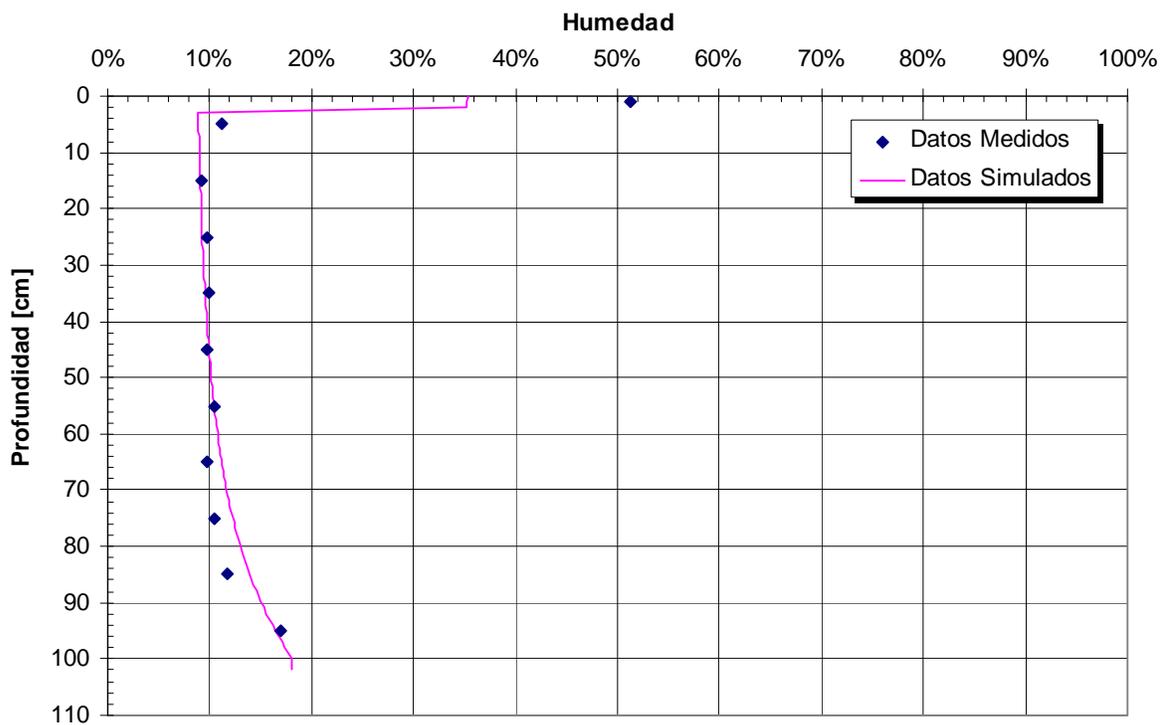


Figura 5.17
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₃B (Perfil Real)



En las Figuras 5.14 y 5.15, se puede observar un claro desfase entre los volúmenes entrantes y salientes de las columnas. Este hecho está relacionado con la capacidad de absorber agua que poseen los suelos y que fue explicado al plantearse la ecuación (5.18).

Tal como se muestra en las Figuras 5.14 y 5.15, se logra un ajuste bastante adecuado entre los volúmenes de salida medidos y los generados mediante el modelo de simulación. En el caso indicado en la Figura 5.14 se obtuvo que un monto de evaporación equivalente al 27.8% de la evaporación de referencia, permite ajustar en forma adecuada el volumen de salida medido y acumulado en la parte inferior de la columna. Al analizar el efecto de la evaporación sobre el percolado infiltrado acumulado en la parte superior de la Columna S₃A el mejor ajuste se logró para un valor equivalente al 2.5% de la evaporación de referencia. Un procedimiento similar fue aplicado a la Columna 2, para la cual se obtuvo un ajuste muy adecuado para un valor de evaporación total equivalente al 22.9% de la de referencia.

Todo lo anteriormente expuesto, sumado al buen ajuste gráfico y los altos coeficientes de correlación, valida el modelo de flujo que se ha planteado para este sistema experimental, el que se apoya en la información medida en dos columnas de experimentación a lo largo de casi 600 días de toma de datos. Del mismo modo, se realizó la calibración para cada uno de los suelos estudiados, donde se obtuvieron muy buenos resultados. En el Anexo 7, se presentan todos los detalles de los gráficos alcanzados por cada una de las columnas.

5.6.3. Comentarios Generales

Una vez calibrados todos los parámetros involucrados en el modelo conceptual, se presenta en la Tabla 5.8 un resumen con los principales resultados.

Al observar los datos obtenidos se pueden sacar una serie de conclusiones, las cuales se enunciamos a continuación:

- La evaporación superior (θ_{sup}) gira en torno a los 2.5% de la evaporación media para la ciudad de Santiago, lo cual es totalmente consistente con lo esperado para las columnas, es decir entre 0% y 100%. Este efecto indeseado sucedió debido a que la forma de construir las columnas impidió dejar totalmente herméticas la parte superior a ellas. Por otro lado, se observa que las columnas S₂ A, S₂B, S₆ A y S₆ B poseen un porcentaje de evaporación superior (θ_{sup}) diferente y menor al total de las columnas calibradas. Este hecho se le atribuye a que los descensos en términos promedio en ambas columnas son iguales o menores a 0.5 cm, lo que hace que la precisión de la estimación de la evaporación sea muy baja, en comparación con las otras columnas, donde los descensos promedio giran en torno a 1 cm. Sumado a lo anterior, las condiciones de operación y las características del suelo, influyeron a que la calibración estas columnas, obtuviésemos valores diferentes al resto.
- Al analizar el porcentaje de evaporación inferior (θ_{inf}), los valores esperados para este porcentaje están en torno a 0% en el caso en que la columna no ha drenado líquido lixiviado y un valor mayor que 0% y menor que 100% en el caso en que las columnas hayan drenado. Este hecho debido a que las columnas estaban a la sombra, cubiertas, pero no herméticas. En términos promedio, se puede observar que los valores de la evaporación inferior oscilan en valor medio de 17%.

Tabla 5.8
Resumen de Parámetros Calibrados e Indicadores de Calidad de Ajuste

Columna	θ_{Sup}	θ_{Inf}	K_1 [cm/hr]	K_2 [cm/hr]	Humedad	Vol de Salida
					Coefficiente Corre	Coefficiente Corre
S ₁ A	2.5%	10.2%	0.025	0.300	98.9%	99.2%
S ₁ B	2.5%	13.0%	0.025	0.030	96.2%	97.4%
S ₂ A	0.0%	0.0%	0.030	4.000	97.2%	-
S ₂ B	0.0%	0.0%	0.030	4.000	99.3%	-
S ₃ A	2.5%	27.8%	0.025	1.000	99.3%	99.8%
S ₃ B	2.5%	22.9%	0.025	1.000	98.3%	99.9%
S ₄ A	-	-	-	-	-	-
S ₄ B	2.5%	19.7%	0.030	0.030	43.7%	97.6%
S ₅ A	2.5%	13.4%	0.030	1.500	98.4%	97.7%
S ₅ B	2.5%	14.1%	0.030	1.500	99.5%	98.5%
S ₆ A	0.5%	7.8%	0.030	0.300	41.4%	94.7%
S ₆ B	0.5%	23.5%	0.030	0.300	49.8%	99.6%
S ₇ A	2.5%	13.7%	0.030	4.000	89.0%	97.5%
S ₇ B	2.5%	17.9%	0.030	4.000	88.8%	88.8%
S ₈ A	2.5%	0.0%	0.030	0.030	77.6%	-
S ₈ B	2.5%	0.0%	0.030	0.030	56.8%	-

- Al realizar una comparación ente las permeabilidades calculadas en laboratorio y calibradas mediante el esquema conceptual planteado (Ver Tabla 5.9), tenemos que las diferencias alcanzadas llegan hasta un orden de magnitud en el caso del suelo S₃ y diferencias despreciables en el caso del suelo S₇. Se podría pensar que los valores de la permeabilidad deberían ser menores que los estimados en laboratorio, debido a que la colmatación disminuiría el valor de este parámetro, pero al plantearse el modelo conceptual, los efectos de la colmatación se los adjudicaría a las tasas de infiltración y se trabajaría con una permeabilidad media promedio en cada estrato y para cada columna.

Tabla 5.9
Comparación entre Permeabilidades Calculadas en Laboratorio y Calibradas en Modelo

Suelo	K_{Sat} Laboratorio [cm/hr]	K_{Sat} Calibrado [cm/hr]	Diferencia [%]	Diferencia Orden Magnitud
S ₁	0.163	0.165	-1.3%	-0.01
S ₂	0.835	4.000	-379.3%	-0.68
S ₃	13.859	1.000	92.8%	1.14
S ₄	0.095	0.030	68.4%	0.50
S ₅	2.488	1.500	39.7%	0.22
S ₆	0.972	0.300	69.1%	0.51
S ₇	3.960	4.000	-1.0%	0.00
S ₈	-	0.030	-	-

- En la mayoría de los suelos las permeabilidades ajustadas disminuyeron con respecto a la situación inicial o de laboratorio (ver Tabla 5.9), lo que estaría reflejando una colmatación del medio poroso. En el caso particular del suelo S₂, se plantea un ostensible aumento de la permeabilidad. Este hecho puede ser atribuido a que el conjunto de parámetros que se

optimizó para cumplir las diferentes restricciones y minimizar los errores entre los volúmenes salientes y entrantes, además de perfiles de humedad, hizo que no pudiese calibrarse de buena manera este parámetro.

- Al observar los valores de la permeabilidad ajustados para la capa de arcilla, estos se encuentran dentro del rango que habla la literatura (valores menores a $3.6 \cdot 10^{-3}$) para limos y arcillas. Lo cual valida el modelo conceptual planteado para el modelo físico.
- El presente análisis considera una serie de parámetros de bondad de ajustes tanto para los caudales de salida de cada columna, como para los perfiles de humedad en las columnas cortadas y no cortadas. Al observar estos parámetros, nos damos cuenta que son bastante elevados, con valores de R^2 mayores a 50% en la mayoría de los casos. Lo anterior, queda validado al observar la tendencia de los valores observados y calibrados en cada uno de las Figuras presentadas, para cada una de las columnas estudiadas. Las tendencias de los modelos, describen de una forma muy adecuada las tendencias temporales de los volúmenes salientes y de los perfiles de humedad.

5.7. Validación de los Modelos Propuestos

El proceso de validación se refirió a la comparación de los volúmenes salientes en las columnas no rotas, con los parámetros calibrados en el proceso anterior.

A diferencia del capítulo de calibración, en el presente se entregaran en forma gráfica y en forma numérica los ajustes alcanzados para cada una de las columnas estudiadas, con el fin de apreciar la calidad de la validación.

Hay que hacer notar que la columna S_4A no fue considerada en el estudio por presentar claros problemas al momento de realizar la calibración.

En el caso particular de las columnas S_3A y S_3B , se posee una mayor cantidad de información para la validación, la que consiste en el perfil de humedad al final del periodo de validación. Este hecho, permite apreciar con un mayor grado de certeza la validación de los parámetros calibrados.

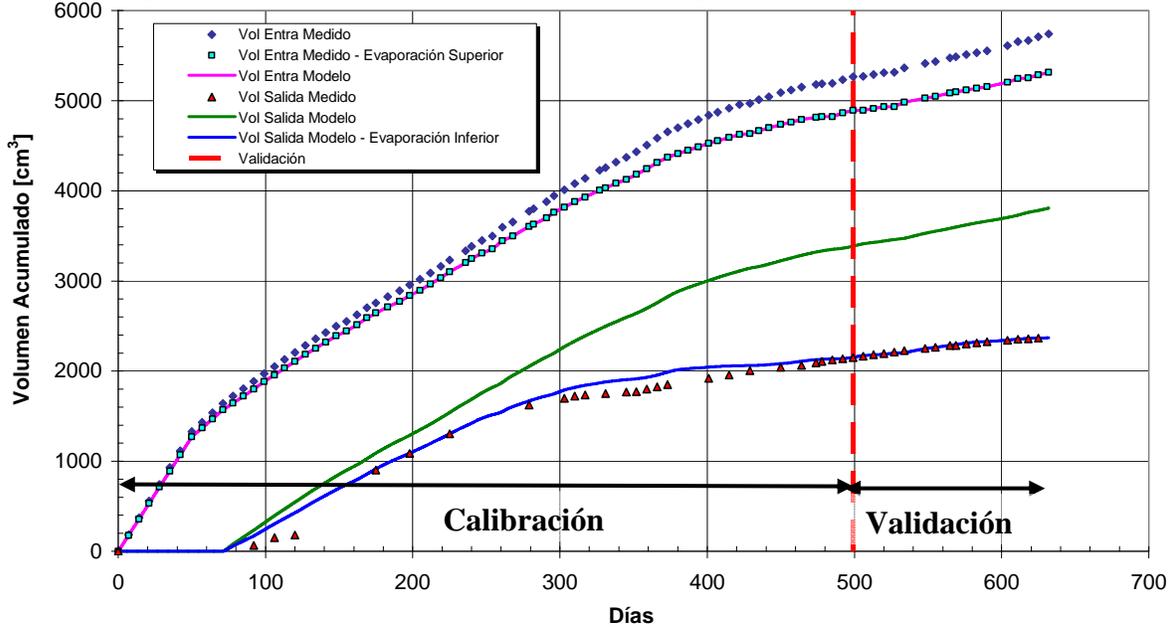
5.7.1. Columna S_1A

En la Figura 5.18 se presenta el set de datos de calibración y validación para la columna S_1A .

Se puede observar el buen ajuste alcanzado por los datos en la serie de validación. La tendencia es creciente de los datos medidos, al igual que la validada.

Figura 5.18

Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₁A



5.7.2. Columna S₂A

En la Figura 5.19 se presenta el periodo de calibración de la columna S₂A, donde se puede apreciar que no existe la evidencia de acumulación de lixiviado por la parte inferior de la columna. El modelo indica que no existe salida de agua por la parte posterior de la columna y que los efectos locales son sólo debido a las condiciones de borde utilizadas. En la Figura 5.20 se presenta el perfil de humedad proyectado para la columna S₂A.

Figura 5.19

Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₂A

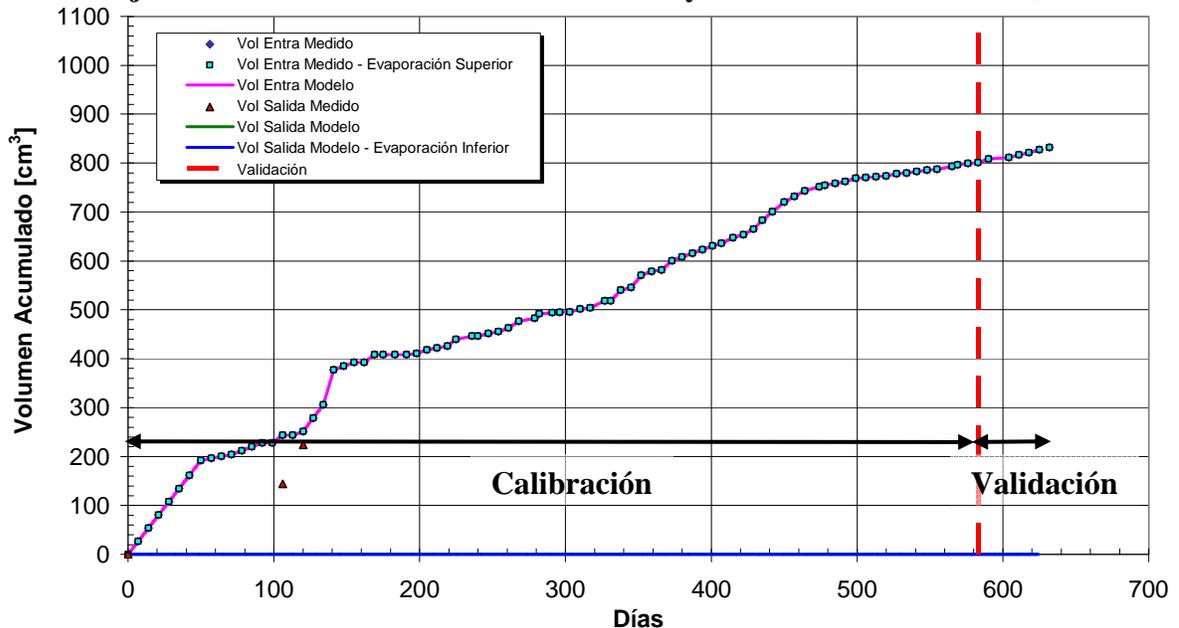
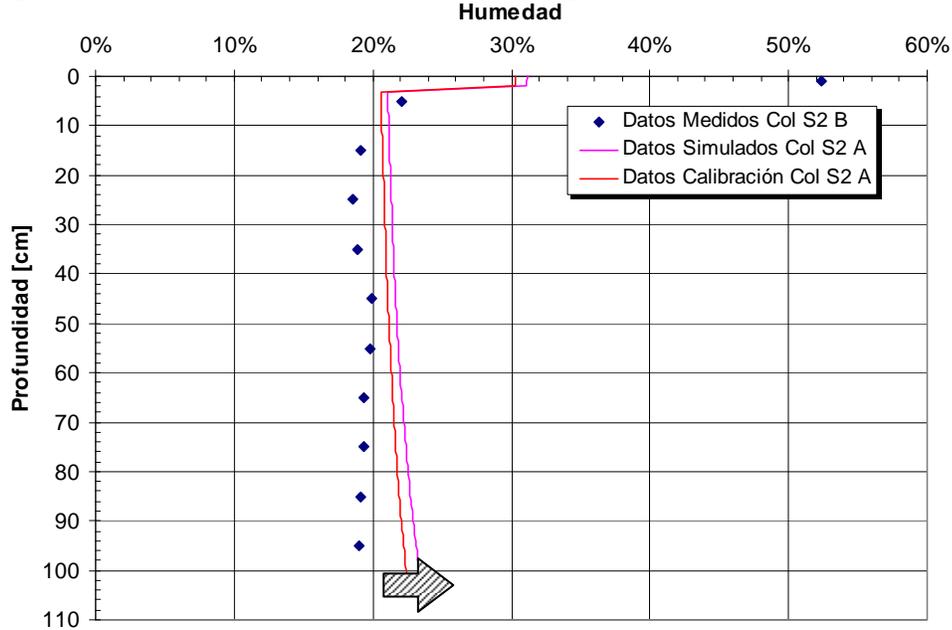


Figura 5.20
Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₁ A



5.7.3. Columna S₃A

La presente columna cuenta con el perfil de humedad final para el periodo de validación, ya que se cortó dicha columna. Se puede observar que los datos simulados recrean la tendencia de los datos, aunque sobreestimando los caudales salientes en un porcentaje menor.

Figura 5.21
Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₃A

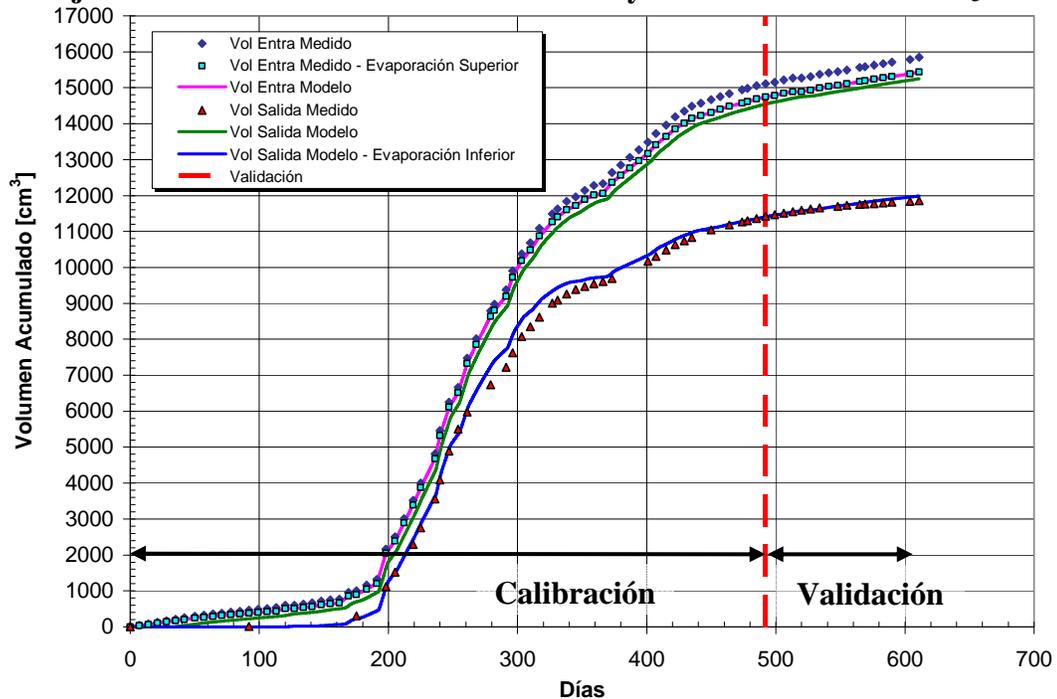
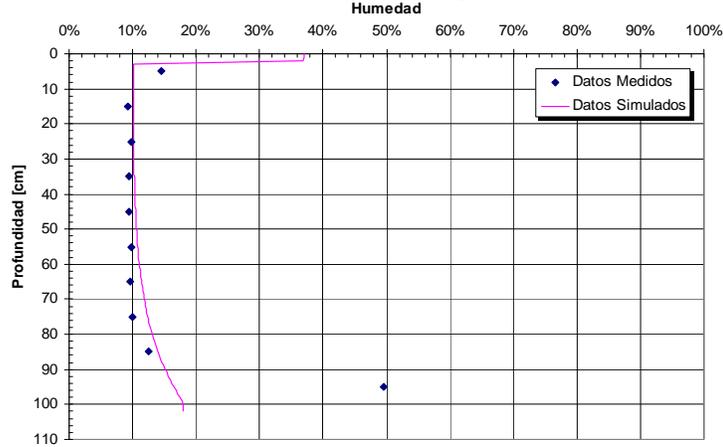


Figura 5.22
Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₃ A

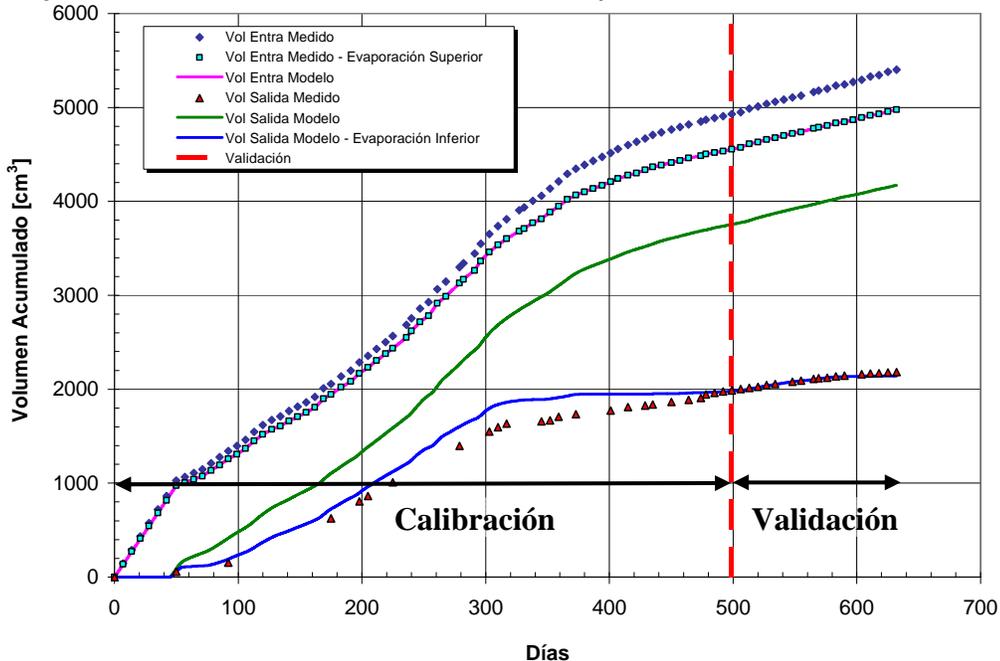


Al observar los datos validados del perfil de humedad, nos damos cuenta, que los valores validados se ajustan de muy buena forma a los valores medidos en terreno, salvo los valores a 5 cm y 95 cm. El dato medido a 5 cm, al igual que todas las otras columnas, se ve muy influenciada por la representatividad de la muestra. En el caso de la muestra de 95 cm, se puede considerar como un punto muy alejado de la tendencia y puede ser atribuida a falta de representatividad de la muestra tomada, a errores de cálculo o a la técnica analítica empleada

5.7.4. Columna S₅B

En la Figura 5.23 se presenta la serie de datos validados para la columna S₅B. Se puede observar la buena tendencia alcanzada por la serie validada con respecto a los datos medidos.

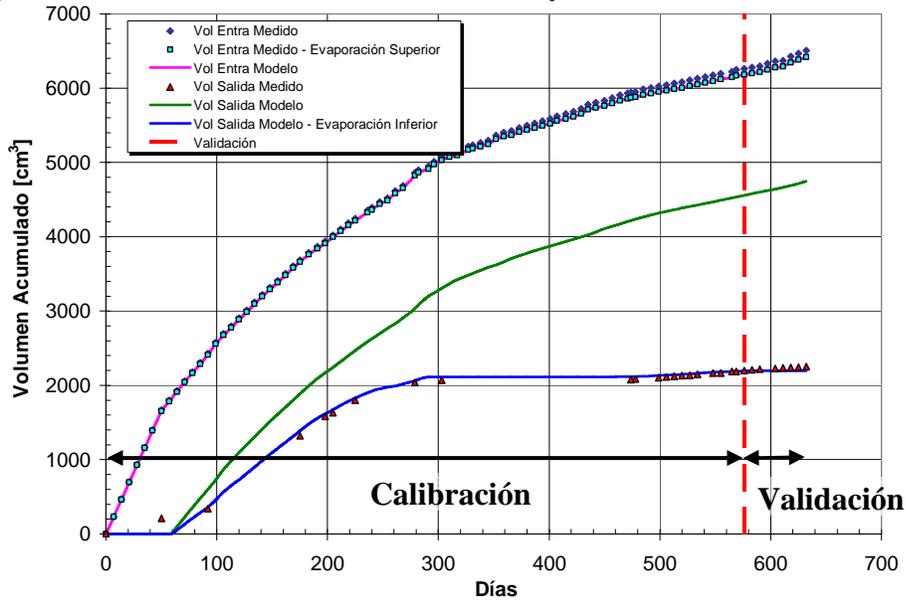
Figura 5.23
Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₅ B



5.7.5. Columna S₆B

En la Figura 5.24 se presenta los ajustes alcanzados por el modelo de flujo no saturado de la columna S₆B, se observa el buen ajuste alcanzado.

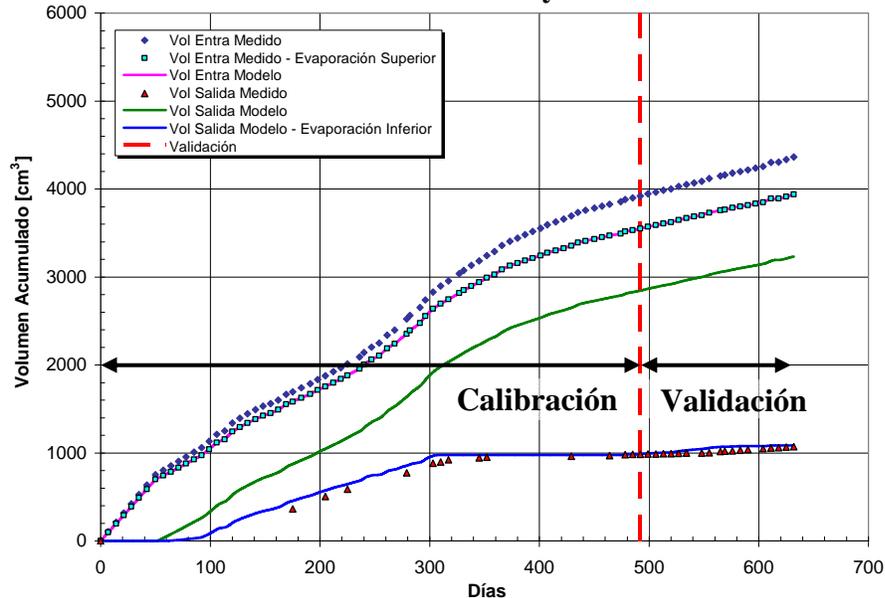
Figura 5.24
Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₆ B



5.7.6. Columna S₇B

En la Figura 5.25 se presenta los ajustes alcanzados por el modelo de flujo no saturado de la columna S₆B, se observa el buen ajuste alcanzado.

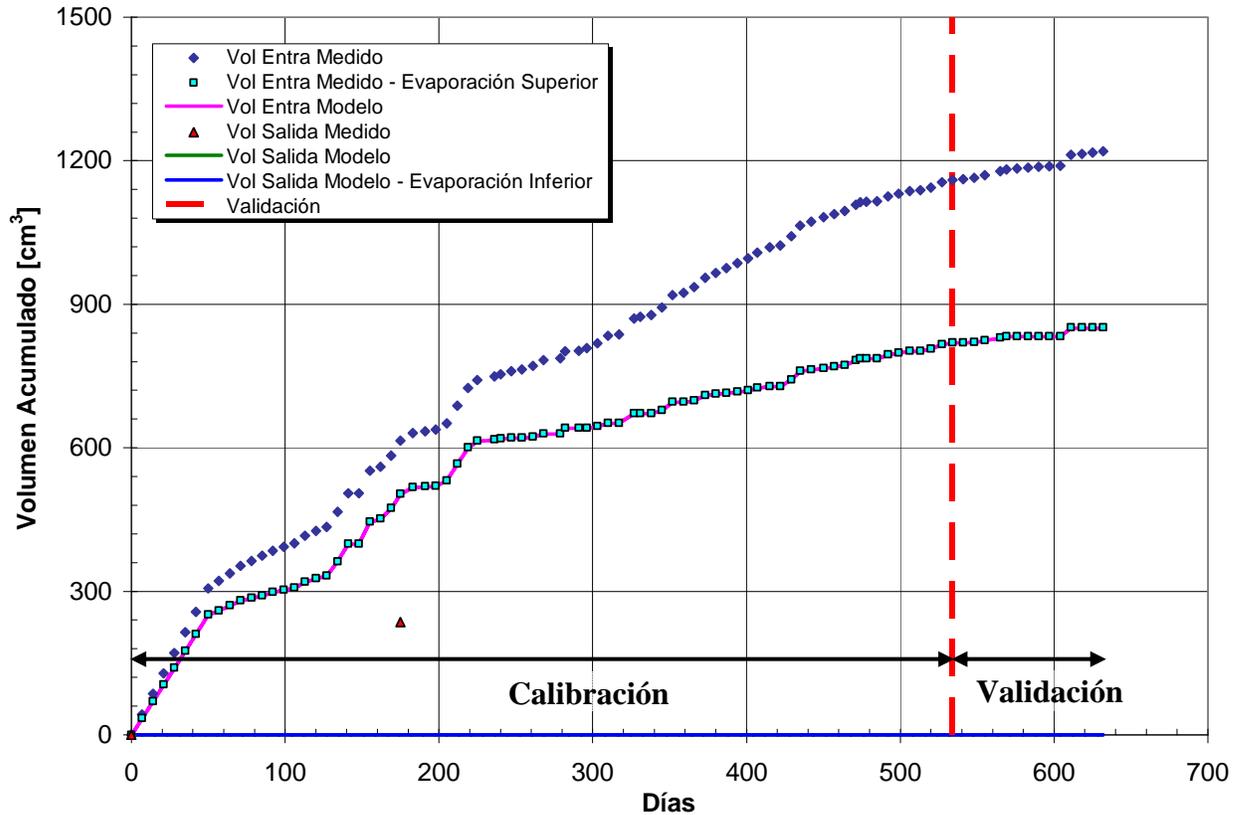
Figura 5.25
Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₇ B



5.7.7. Columna S₈B

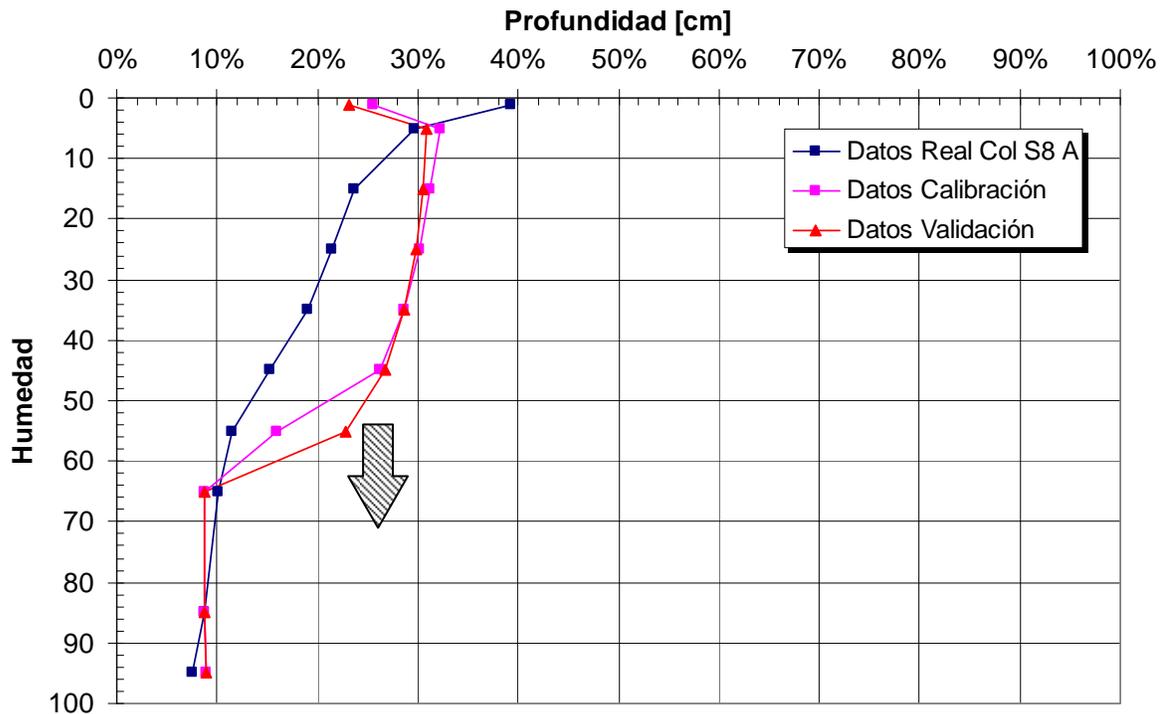
El suelo S₈B, corresponde al suelo más arcilloso de todos los estudiados. La validación alcanzada por el modelo propuesto, es concordante con lo que se encuentra pasando en la realidad, en cuanto a que no existen caudales salientes en la columna.

Figura 5.26
Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₇ B



Al comparar los diferentes perfiles de humedad obtenidos para los tiempos de calibración y de validación, teniendo como referencia el periodo de calibración de la columna S₈A, nos damos cuenta que el perfil de humedad va avanzado a lo largo de la columna, a medida que pasa el tiempo, pero de forma muy lenta. Este hecho se puede observar en la Figura 5.27.

Figura 5.27
Ajuste Volúmenes Acumulados Validados y Observados Columna S₇B



5.7.8. Comentarios

En cada una de las columnas se generaron estimadores de bondad de ajuste de los caudales de salida y en la columna S₃A, se generaron estimadores de bondad de ajuste de los perfiles de humedad. Todos estos valores se pueden apreciar en la Tabla 5.10, presentada a continuación.

Tabla 5.10
Resumen de Estimadores de Bondad de Ajuste
Proceso de Validación

Columna	θ_{Sup}	θ_{Inf}	K_1 [cm/hr]	K_2 [cm/hr]	Humedad	Volumen de Salida
					Coeficiente Corre	Coeficiente Corre
S ₁ A	2.5%	10.2%	0.025	0.300	-	99.9%
S ₂ A	0.0%	0.0%	0.030	4.000	-	-
S ₃ A	2.5%	27.8%	0.025	1.000	91.2%	99.8%
S ₅ B	2.5%	14.1%	0.030	1.500	-	97.5%
S ₆ B	0.5%	23.5%	0.030	0.300	-	99.4%
S ₇ B	2.5%	17.9%	0.030	4.000	-	98.7%
S ₈ B	2.5%	0.0%	0.030	0.030	-	-

Visualmente, se puede observar que en la mayoría de las columnas, los caudales de salida estimados a través del modelo de flujo no saturado, con evaporación por la parte inferior, se ajustan bastante bien a los datos medidos. En el caso en que se dispone de datos del perfil de

humedad S₃A, se puede apreciar que el perfil simulado tiene una muy buena correlación con los datos de humedad medidos en la columna. Este hecho valida el uso de los modelos de simulación para el estudio de flujo de lixiviados en la zona no saturada de suelos naturales.

Otro hecho digno de comentar, tiene que ver con el perfil de humedad alcanzado por la columna S₇B, donde el comportamiento esperado en la columna, es decir, perfiles con un frente de humedad muy abrupto, se cumplen para los tiempos mayores de calibración. Además, el volumen saliente por la parte inferior de la columna es nulo.

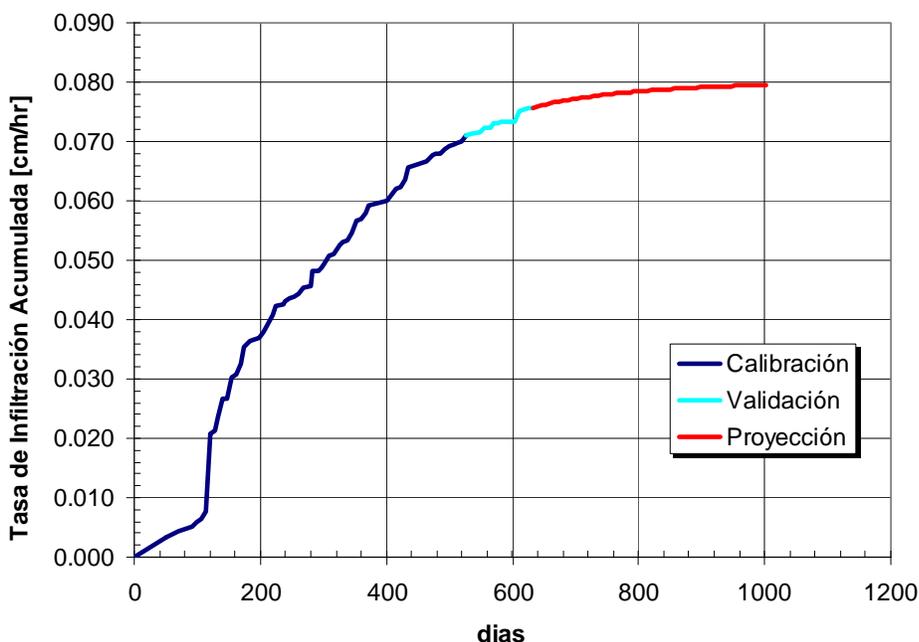
5.8. Estimación de Frente de Humedad

A continuación se presenta la estimación del frente de humedad, utilizando una proyección de las tasas de infiltración, utilizando un modelo exponencial decreciente de decaimiento de las tasas de infiltración y la mantención de la permeabilidad promedio fija en el tiempo.

5.8.1. Proyección Columna S₇B

En la proyección de los volúmenes salientes y frentes de humedad en la columna S₇B, se utilizó un modelo exponencial decreciente, para la estimación de las tasas de infiltración en el tiempo, considerando la colmatación del medio poroso. En la Figura 5.28, se presentan los datos utilizados.

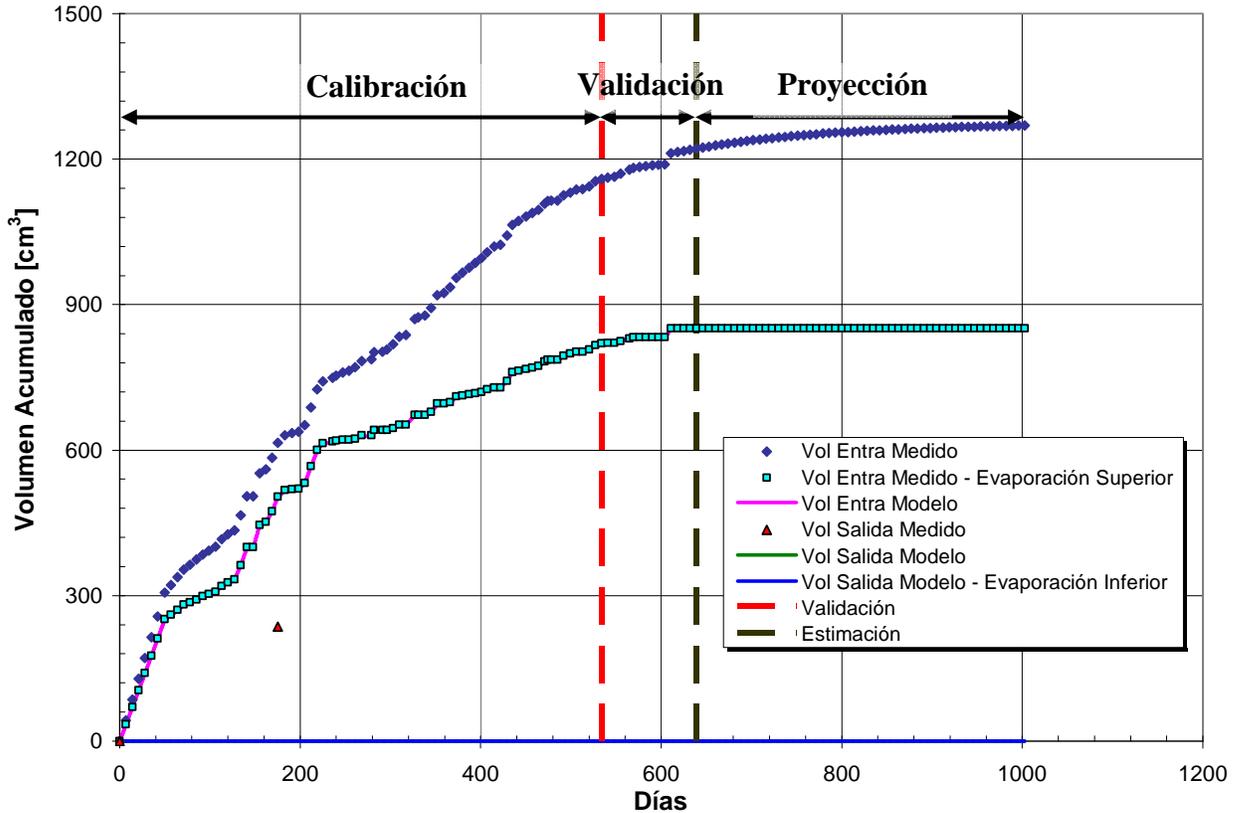
Figura 5.28
Tasas de Infiltración Columna S₇B Considerando Colmatación del Medio Poroso



Según este modelo exponencial de estimación de las tasas de infiltración, se proyectó que a los 734 días la tasa de infiltración de la columna S₇B, sería igual a 0.0001 cm/hr. Este valor se impuso suponiendo que el medio poroso alcanzaría una permeabilidad igual o menor a las permeabilidades equivalentes requeridas por la autoridad, para rellenos sanitarios.

Al observar los resultados obtenidos (Figura 5.29), nos damos cuenta que dentro del tiempo de validación las tasas de infiltración alcanzan un valor nulo debido principalmente a la colmatación del medio poroso y en menor medida a los efectos de la evaporación superior, dejando que sólo el frente de humedad continúe humedeciendo el suelo.

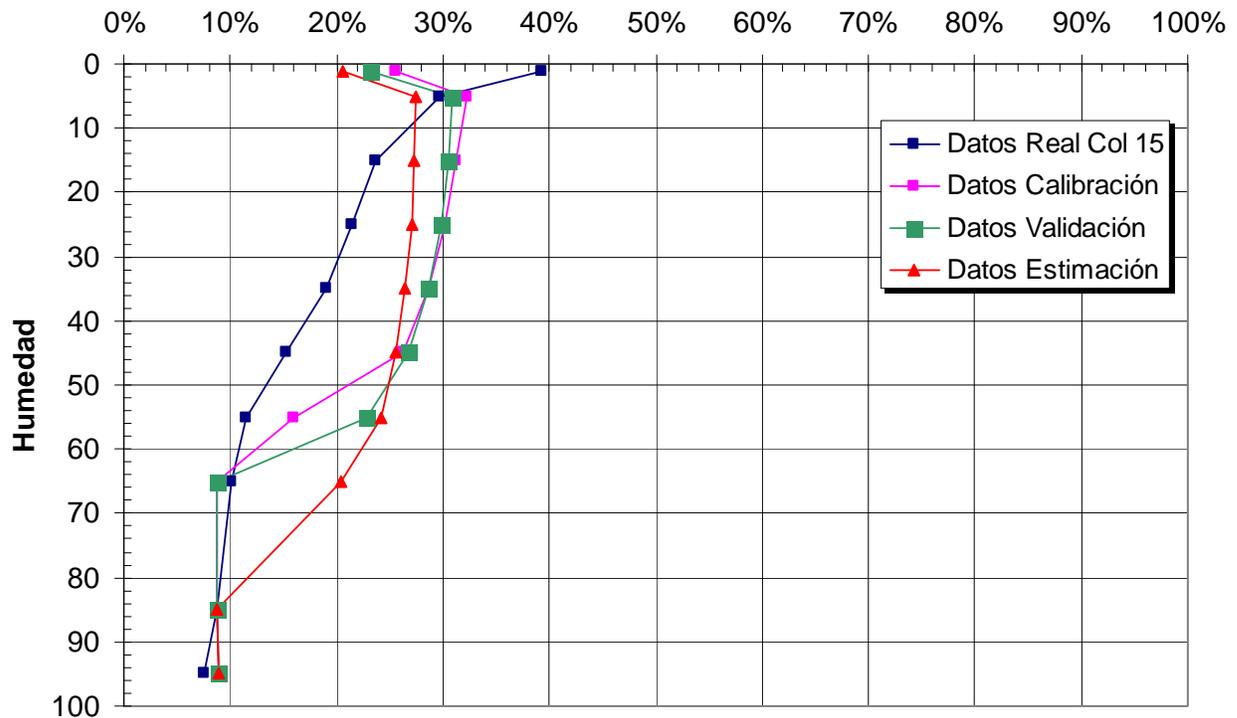
Figura 5.29
Proyección de los Volúmenes Salientes Columna S₇B



Al realizar el análisis de los frentes de humedad en la columna S₇B, se utilizó un tiempo de validación total de 1000 días. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.30.

El análisis numérico anteriormente expuesto a un caso real de un relleno sanitario con características similares a la construcción de las columnas, es decir una capa de arcilla y un suelo natural bajo la capa de arcilla, donde existe una migración de percolado por la capa de arcilla, al largo plazo por efectos de la colmatación del suelo se va a producir una disminución de las tasas de filtración, que a la larga significa una nula infiltración.

Figura 5.30
Perfiles de Humedad Projectados en Columna S₇ B
Profundidad [cm]



5.9. Tiempos de Salida de Las Columnas

Se estimó en base a los datos medidos en terreno, los tiempos de salida de los percolados en cada una de las columnas estudiadas. De la misma forma, se presenta la estimación de los tiempos de salida en base a los modelos numéricos empleados. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.11.

Se puede observar que en el caso del suelo S₁, se alcanzan tiempos de salida real y simulados muy parecidos, al igual que en el suelo S₆. Sin embargo existen suelos como S₃, S₄, S₅ y S₇, donde los rangos de variación de los tiempos simulados con respecto a los observados son aceptables desde el punto de vista del modelo conceptual empleado.

En el caso particular del presente estudio, los tiempos de salida de lixiviado de las columnas son un parámetro de calibración, que en conjunto con el volumen de lixiviado saliente y perfil de humedad, entre otros, acotaron algunos rangos de variación de los parámetros de flujo en la zona no saturada.

Tabla 5.11
Tiempos Estimados de Salida Reales y Simulados

Columna	Modelo	Real Estimada	%
	Tiempo Salida [días]	Tiempo Salida [días]	
S ₁ A	71	80	10.9%
S ₁ B	111	120	7.2%
S ₂ A	-	-	-
S ₂ B	-	-	-
S ₃ A	120	86	-39.3%
S ₃ B	91	120	24.1%
S ₄ A	107	-	-
S ₄ B	76	125	39.4%
S ₅ A	42	11	-182.6%
S ₅ B	45	26	-73.8%
S ₆ A	446	448	0.5%
S ₆ B	59	63	6.6%
S ₇ A	50	90	44.0%
S ₇ B	61	96	36.3%
S ₈ A	-	-	-
S ₈ B	-	-	-

5.10. Comentarios y Conclusiones

Al analizar los diferentes procesos realizados (calibración, validación y proyección), podemos concluir lo siguiente:

- El modelo conceptual empleado para caracterizar el movimiento de lixiviados a través de medios porosos saturados, está completamente validado, en cuanto a volúmenes salientes y perfiles de humedad encontrados para la mayoría de los suelos estudiados.
- El proceso metodológico planteado para estimar los principales parámetros de flujo en zonas no saturada, resultó satisfactorio. Esto debido a que los parámetros calibrados: permeabilidades, coeficientes característicos de las curvas de succión, coeficientes de evaporación, perfiles de humedad y volúmenes salientes se encuentran dentro de los rangos esperados.
- La validación alcanzada en las columnas con mayor información (volúmenes salientes y perfiles de humedad), es bastante buena y indica la validez de la metodología empleada.

Luego, como conclusión final del presente capítulo, podemos afirmar con toda certeza que es posible modelar el flujo de lixiviados ($\rho \neq 1$), a través de medios porosos no saturados, donde el medio poroso se colmata por efecto de los sólidos suspendidos presentes en el líquido lixiviado.

6. COLMATACION Y DESCOMPOSICION DEL ESTRATO DE ARCILLA EN LAS COLUMNAS

6.1. Introducción

Uno de los procesos que se presentó en la mayoría de las columnas de suelo fue la atenuación natural de tipo físico, la que corresponde básicamente a la colmatación del medio poroso debido al taponamiento de los intersticios existentes en la matriz de suelo reconstituido de las columnas. Desde el punto de vista práctico la migración de percolados en las columnas y bajo las condiciones experimentales, tanto de capas de suelo (natural y arcilloso) y diferentes calidades de percolado en el tiempo, es altamente probable de encontrar en rellenos sanitarios o basurales.

Cabe señalar que uno de los principales mecanismos que produce la colmatación del medio poroso es la depositación los sólidos suspendidos provenientes de los lixiviados y posterior taponamiento de los poros por parte de ellos. Este proceso, en conjunto con el crecimiento de colonias de bacterias, que se adaptan al medio, hace que existan zonas en la columna que se colmatan. Estas zonas son principalmente bajo la arcilla, en el estrato de suelo natural.

Todo el proceso antes mencionado, en cuanto al proceso de colmatación por filtración mecánica, se puede asimilar de alguna forma a la teoría de filtración aplicable en agua potable.

Los fenómenos de hinchamiento de las arcillas, cuando se encuentran en proporción apreciable, pueden llegar a producir drásticas reducciones de permeabilidad. La literatura cita para suelos holandeses (en el caso de infiltraciones de agua) que secos presentan una permeabilidad de 50 m/día debido a la presencia de grandes grietas, mientras que después de algunos meses de inmersión, el hinchamiento de las arcillas las reduce a 0.01 m/día. En el caso particular de las columnas de suelo estudiadas, el sello ubicado en la parte superior correspondió a una capa de arcilla reconstituida, compuesto en un alto porcentaje por bentonita (arcilla).

A continuación, se presentó una serie de datos que confirman la existencia de la colmatación en el medio poroso, evaluado en base a la disminución de las tasas de infiltración de cada columna. Se procedió a la estimación de parámetros tales como: tasas de decaimiento, tiempo estimativo donde el fenómeno de colmatación cobraría mayor importancia, además de explicaciones del fenómeno que se encuentra ocurriendo en la matriz de suelo.

6.2. Tasas de Infiltración

En cada columna se evaluó las tasas de infiltración en función del tiempo, obteniendo tendencias temporales, que en las mayorías de los casos indican la presencia de la colmatación del medio poroso.

Para realizar un análisis comparativo entre las tasas de infiltración en la fase de colmatación entre los diferentes suelos, se procedió a ajustar una serie de relaciones matemáticas. Se

encontró que la que mejor interpreta el fenómeno corresponde a la exponencial, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I = I_m e^{-\beta t} \quad (6.1)$$

donde I_m representa la tasa de infiltración para $t = 0$, β la tasa de decaimiento del sistema y t el tiempo en que ocurre el fenómeno.

Se apreció que en la mayoría de las columnas, excepto una, existe una clara y pronunciada tendencia a la colmatación. También se identificó un punto en el tiempo, para cada columna donde los fenómenos de colmatación cobran mayor importancia. Este punto se denominó D_1 . En la mayoría de los casos se pudo identificar a simple vista y en el resto, resultó de encontrar el punto de inicio en el tiempo que da el mejor coeficiente de correlación (R^2) en las tasas de decaimiento.

A continuación en las Figuras 6.1 a 6.8, se presenta en forma gráfica las tasas de infiltración en función del tiempo y los ajustes de un modelo de decaimiento exponencial, que refleja de muy buena forma la tendencia media a la colmatación del medio poroso (línea negra). Además, se incluye un intervalo de confianza superior e inferior (líneas rojas), que se define como el que abarca el 50% de los puntos que quedan por sobre o por debajo de la recta teórica para el comportamiento de las tasas de infiltración. Se puede apreciar la existencia de puntos destacados en las figuras que corresponden a los que se tomaron para la realización del modelo exponencial de decaimiento de las tasas de infiltración.

Se puede observar que en la mayoría de los casos, existe un periodo inicial, en el cual las tasas de infiltración aumentan, debido probablemente a la humectación del suelo e hinchamiento de la bentonita. Este efecto lo describe claramente la Figura 2.10. Luego, debido a que los efectos de la colmatación o taponamiento del suelo (capa de bentonita y suelo natural), por el efecto de filtración mecánica, hace que las tasas decaigan en forma exponencial, con una clara tendencia en el infinito a nulas tasas de infiltración.

En la Figura 6.4 columna S_4A , se puede observar un comportamiento de las tasas de infiltración fuera de lo esperado. Este hecho se puede explicar por varios motivos, entre los que se cuentan: defectuoso llenado de la columna y errores de medición debido a que los descensos fueron muy pequeños.

Figura 6.1
Tasas de Infiltración Columnas S₁A y S₁B

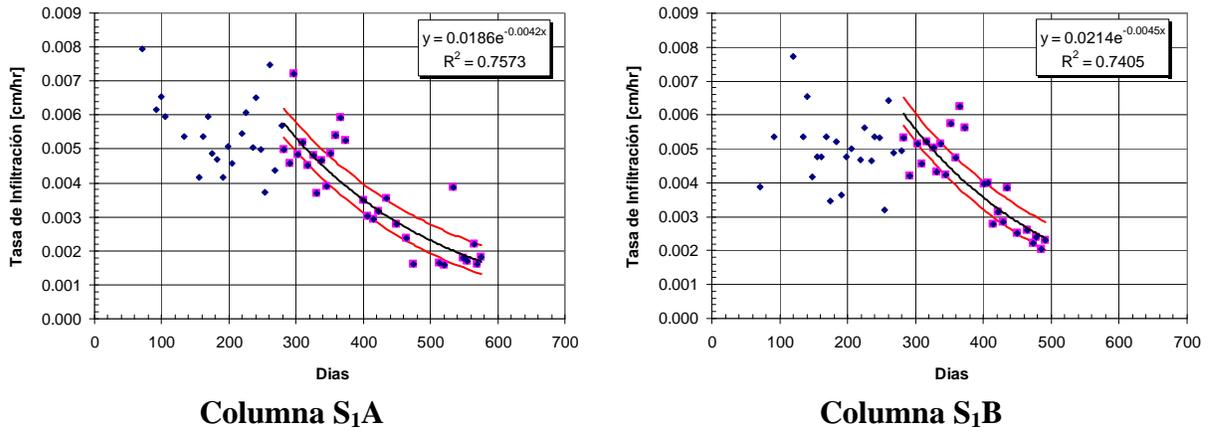


Figura 6.2
Tasas de Infiltración Columnas S₂A y S₂B

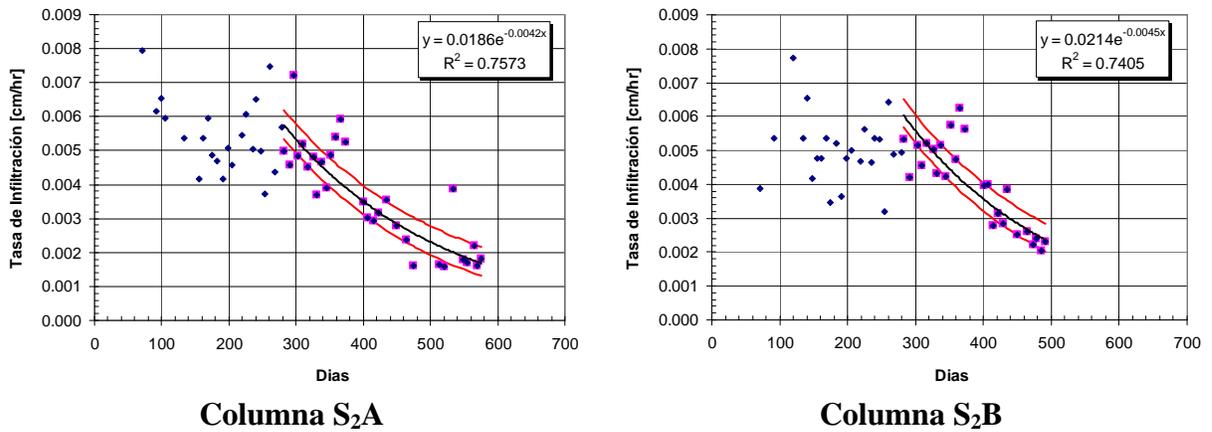


Figura 6.3
Tasas de Infiltración Columnas S₃A y S₃B

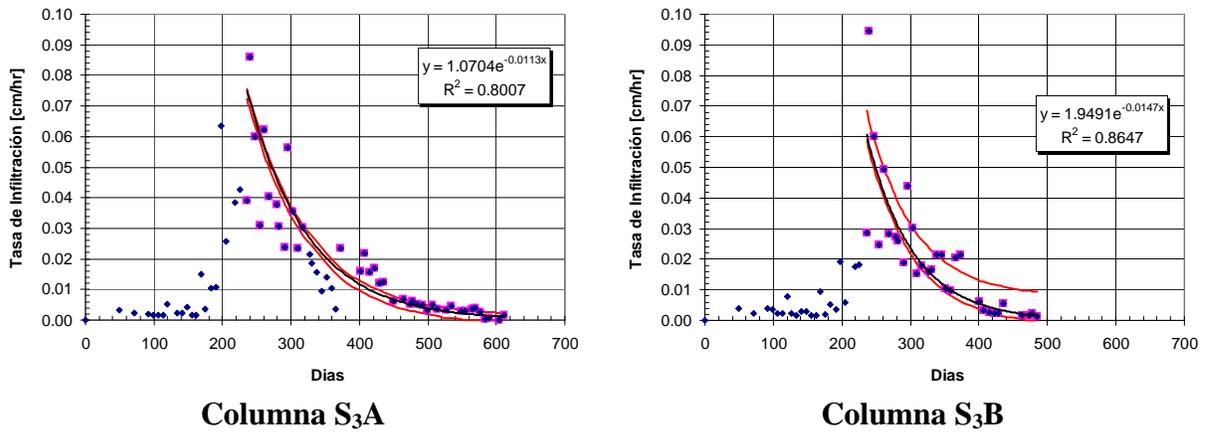


Figura 6.4
Tasas de Infiltración Columnas S₄A y S₄B

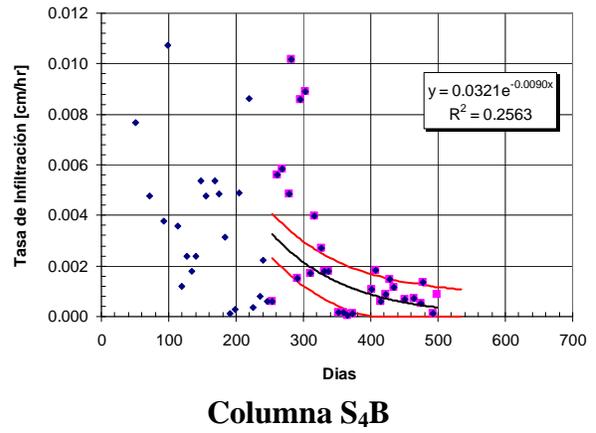
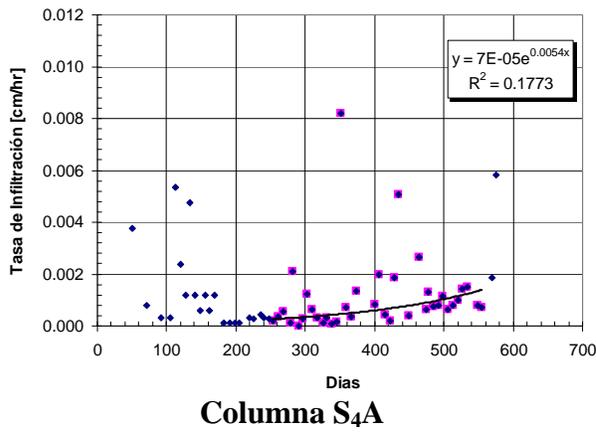


Figura 6.5
Tasas de Infiltración Columnas S₅A y S₅B

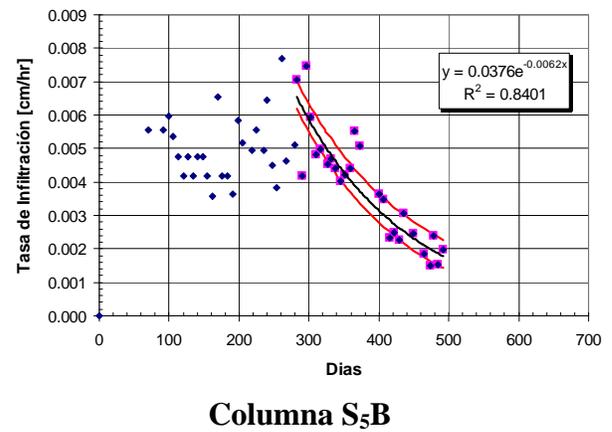
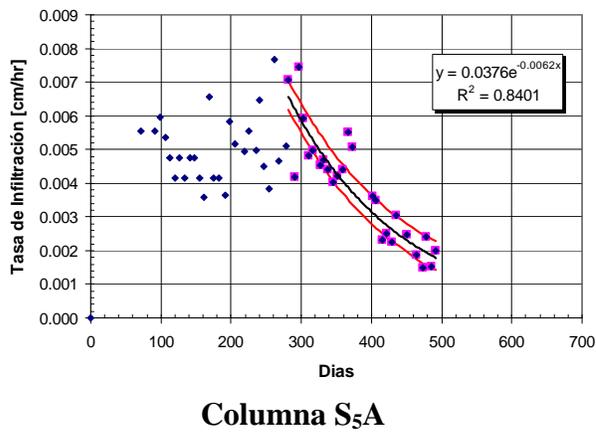


Figura 6.6
Tasas de Infiltración Columnas S₆A y S₆B

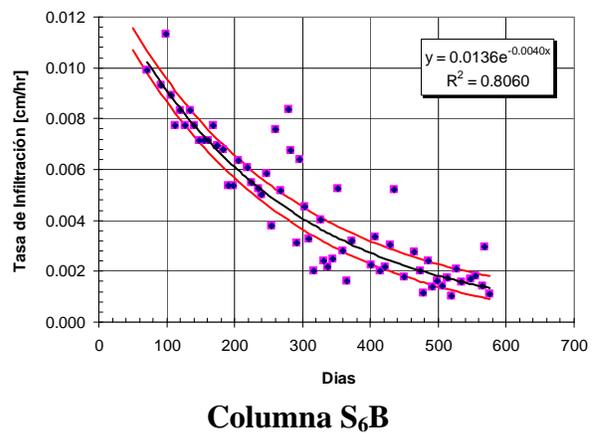
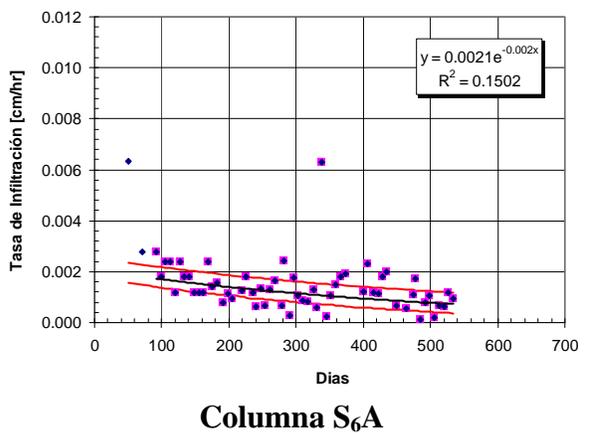


Figura 6.7
Tasas de Infiltración Columnas S₇A y S₇B

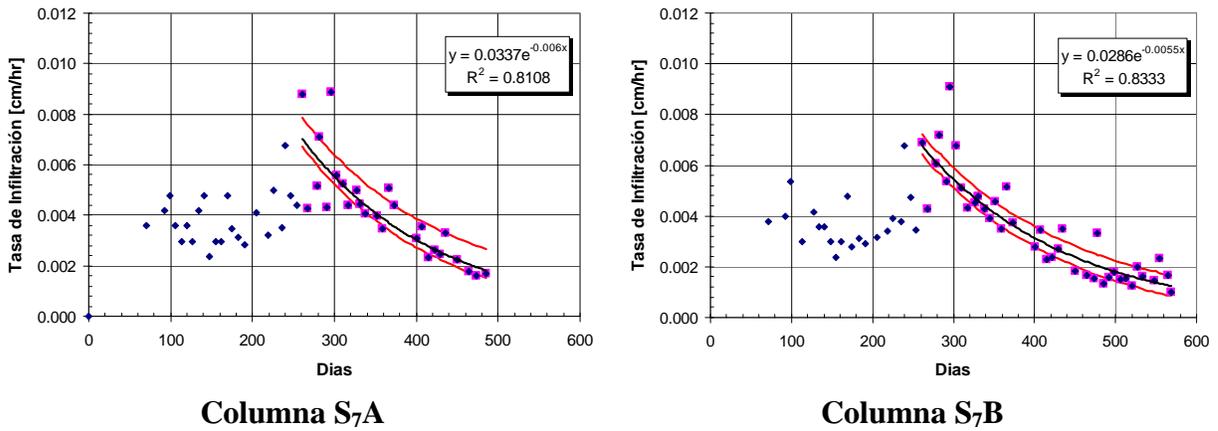
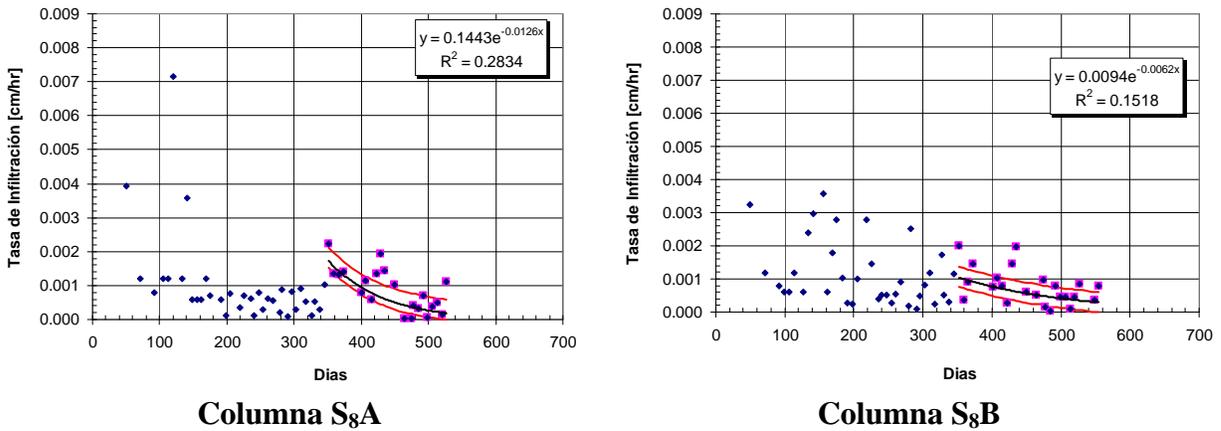


Figura 6.8
Tasas de Infiltración Columnas S₈A y S₈B



En la Tabla 6.1, se presenta un resumen de los coeficientes calibrados para cada una de las columnas estudiadas.

Hay que destacar que el ajuste alcanzado para las tasas de infiltración es para un caso promedio y existe un alto grado de dispersión de los datos al considerar el intervalo de confianza planteado. Por ejemplo, en el caso de la columna S₈B, para una tasa de infiltración de 0.0008 cm/hr, los días en que se produce pueden variar entre 350 y 480, con un valor medio de 400 días. Teniendo en cuenta el amplio rango de variación de las tasas de infiltración, se trabajó con los valores medios de infiltración.

Tabla 6.1
Resumen de Parámetros Característicos de la Colmatación Por Columna

Suelo	Columna	Im [cm/hr]	β	R ²	D ₁ [días]
S ₁	A	0.0186	-0.0042	75.73%	282
S ₁	B	0.0214	-0.0045	74.05%	282
S ₂	A	0.0116	-0.0073	39.74%	327
S ₂	B	0.0255	-0.0086	30.86%	366
S ₃	A	1.0704	-0.0113	80.07%	236
S ₃	B	1.9491	-0.0147	86.47%	236
S ₄ (*)	A	0.0001	0.0054	17.73%	-
S ₄	B	0.0321	-0.0090	25.63%	254
S ₅	A	0.0376	-0.0062	84.01%	282
S ₅	B	0.0314	-0.0055	83.79%	268
S ₆	A	0.0021	-0.0020	15.02%	92
S ₆	B	0.0136	-0.0040	80.60%	71
S ₇	A	0.0337	-0.0060	81.08%	261
S ₇	B	0.0286	-0.0055	83.33%	261
S ₈	A	0.1443	-0.1260	28.34%	352
S ₈	B	0.0094	-0.0062	15.18%	352

(*) Dato no utilizado, comportamiento fuera de lo esperado.

6.3. Estimación de Tiempos De Colmatación

Con los datos presentados en la Tabla 6.1, se puede realizar una estimación del tiempo en que el medio poroso alcanza un grado de colmatación tal que el paso de agua a través del medio poroso es mínimo. El supuesto a considerar sería que la tendencia a la colmatación en el tiempo se mantendrá constante, de acuerdo a la ley exponencial encontrada.

En el anteproyecto de “Reglamento de Rellenos Sanitarios” llamado a consulta el 3 de enero del 2003, se especifica una serie de “Requerimientos Mínimos de Impermeabilización” que dependen de la pluviometría en la zona de estudio. Los criterios más exigentes en cuanto a la impermeabilización hablan que deberá colocarse una capa de arcilla de a lo menos 60 cm de espesor con una conductividad hidráulica máxima de 10^{-7} cm/s o en su defecto un sistema de impermeabilización de dos membranas que garantice condiciones iguales o superiores de estanqueidad del sistema.

Por otro lado, los expertos hablan que el sistema de impermeabilización completo o permeabilidad equivalente (suelo natural, capa de arcilla y/o material sintético) que se debe esperar en un sello sanitario, debiese variar entre 10^{-7} y 10^{-6} cm/s ($3.6 \cdot 10^{-4}$ a $3.6 \cdot 10^{-3}$ cm/hr).

Basados en los criterios recién expuestos, se estimó la tasa de infiltración más desfavorable que podría explicar la colmatación del medio poroso equivalente, entre la capa de arcilla y el suelo natural, al paso de los lixiviados, sería un valor de 10^{-7} cm/s o $3.6 \cdot 10^{-4}$ cm/hr. Para efectos prácticos se considerará una permeabilidad de colmatación de 10^{-4} cm/hr. Se consideró

que las tasas de infiltración y las permeabilidades al largo plazo, cuando se sella el medio poroso son iguales.

Dado este valor, y suponiendo que las tasas de colmatación medias estimadas, para cada uno de los suelos estudiados se mantendrán en el tiempo, se realizó una proyección utilizando el modelo exponencial ajustado anteriormente. Se denominó D_2 al número de días en que se alcanza una permeabilidad de colmatación. En la Tabla 6.2, se presentan los valores estimados para cada una de las variables.

Tabla 6.2
Estimación de Tiempos de Colmatación del Medio Poroso

Suelo	Columna	D_2 [días]	Suelo	Columna	D_2 [días]
S ₁	A	1244	S ₅	A	957
S ₁	B	1194	S ₅	B	1046
S ₂	A	652	S ₆	A	1527
S ₂	B	645	S ₆	B	1230
S ₃	A	822	S ₇	A	971
S ₃	B	673	S ₇	B	1029
S ₄	A	-	S ₈	A	578
S ₄	B	642	S ₈	B	734

(*) Dato no utilizado, comportamiento fuera de lo esperado.

6.4. Degradación de las Arcillas

En la mayoría de los rellenos sanitarios se utilizan mezclas de sistemas de impermeabilización, dentro de los que se cuentan HDPE junto con capas de arcillas. Si se considera que todo material se deteriora, por efectos químicos y por tensiones a las que no está diseñado, lo más probable es que el HDPE al largo plazo, falle y deje migrar los lixiviados al sello de arcilla. Esto deja en evidencia que los desechos no pueden ser aislados por un periodo infinito.

Si bien las arcillas son un sello bastante utilizado para independizar los lixiviados de los rellenos y evitar la contaminación de suelo y aguas, existe evidencia experimental y bibliográfica (nacional e internacional) donde se habla de la degradación de las arcillas por efecto del contacto con los lixiviados. Sumado a lo anterior hay que añadir posibles quiebres de la capa de arcilla por eventos geológicos o esfuerzos diferenciales producidos por la operación del relleno.

Se ha demostrado un alto grado de interacción entre el líquido lixiviado (Joseph et al, 2001) y las arcillas de origen mineral. Muchos especialistas muestran que el intercambio catiónico entre arcillas smectíticas (grupo de las montmorillonitas, que absorben gran cantidad de agua) causan el colapso de la estructura cristalina y alteración de la montmorillonita a diferentes formas de illita. Este efecto produce una tendencia a la aglomeración del material. Quigley et al (Quigley et al, 1998) observó que tal aglomeración produjo un incremento del coeficiente de permeabilidad de las arcillas aproximadamente en tres órdenes de magnitud.

En el presente estudio experimental se simuló la capa de arcilla como una mezcla de arenas y bentonita, en proporciones de 50% y 50%. La bentonita es una arcilla expansiva del grupo de las montmorillonitas.

Durante la operación de la instalación experimental, se observó un fenómeno de arrastre de una fracción muy pequeña del material fino de las arcillas. Este hecho se evidenció al momento de recolectar los lixiviados efluentes de las columnas. Este fenómeno de arrastre, podría considerarse como parte de la degradación de la capa de arcilla, aumentando la permeabilidad en algunos sectores de las columnas, por disminución del material fino que sella los espacios.

Además, se observó al momento del rompimiento de las columnas, que en la mayoría la capa de arcilla se encontraba descompuesta y fluidizada, en la parte que se encontraba en contacto con el líquido lixiviado. En forma cualitativa, se puede decir que la permeabilidad final de la capa de arcilla, debido a un conjunto de fenómenos de degradación e hinchazón, aumento ostensiblemente de valor.

6.5. Comentarios y Conclusiones

Al observar los resultados mostrados en este capítulo, podemos afirmar que el fenómeno de colmatación del conjunto arcilla - suelo natural se está llevando a cabo en la instalación experimental. Además, se pudieron estimar tasas de decaimiento de la infiltración, que están directamente relacionadas con la permeabilidad completa del sistema. Todo lo anterior llevó a estimar que el medio poroso tiende al “sellamiento” o colmatación total, lo cual corresponde a una defensa del acuífero o en otras palabras una atenuación natural del sistema frente a la colmatación.

Podemos afirmar sin pérdida de rigurosidad, que si se produjese migraciones no controladas desde rellenos sanitarios o vertederos ilegales, fenómenos de colmatación física, biológica y química, como los planteados en el presente capítulo se llevarían a cabo de mayor o menor forma, dependiendo de la carga hidráulica del sistema y de las características hidráulicas del medio poroso equivalente (conjunto arcilla, material sintético y suelo natural).

Por otro lado, existen pruebas cualitativas del presente estudio y cuantitativas de literatura internacional especializada, que afirman que el fenómeno de descomposición de las arcillas debido a la presencia de lixiviados ocurre por lo que debería ser considerada al momento del diseño del sistema de impermeabilización de un relleno sanitario moderno. Una forma podría ser considerar factores de seguridad mayores en el caso del diseño del espesor de la capa de arcilla, pudiendo aumentar el tiempo de retención del líquido lixiviado, aumentando así el decaimiento natural del lixiviado y disminuyendo una posible contaminación del agua subterránea.

La colmatación de un medio poroso es un proceso continuo en el tiempo que depende tanto de las características del medio poroso, como de las características del líquido infiltrado.

7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En este capítulo se indican las principales conclusiones obtenidas de cada uno de los temas abordados en presente estudio. El tema abordado con mayor fuerza y profundidad fue la modelación del problema de flujo no saturado de los lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. Como temas complementarios y de apoyo a la parte hidráulica se presentan las componentes calidad y toxicológica. Por otra parte, se trató de integrar cada una de las componentes anteriormente mencionadas, para así conseguir una explicación más integral de la atenuación natural frente a la contaminación de lixiviados que migran desde relleno sanitario o basural en la zona no saturada.

7.1. Comentarios y Conclusiones Hidráulicas

Se realizó una caracterización de una amplia gama de suelos (8 tipos), lo que permitió obtener valiosa información en cuanto a: granulometría, permeabilidades, densidades en las columnas, humedades iniciales, etc., que fueron la base de la modelación numérica del flujo en la zona no saturada.

Luego de operar las columnas por aproximadamente dos años, se obtuvieron los datos suficientes para realizar la calibración, validación y proyección, de un modelo de flujo de lixiviados en la zona no saturada. Junto con lo anterior se generó un modelo conceptual que permitió explicar algunos fenómenos no controlados en la instalación experimental.

Para utilizar el modelo conceptual propuesto, se supuso que la densidad del líquido lixiviado utilizado en las columnas es muy parecida a las del agua limpia (supuesto base de la teoría de flujo en medios no saturados), lo que quedó reflejado en los datos experimentales obtenidos.

Se observó que en la mayoría de las columnas existe un marcado fenómeno de colmatación a partir de un cierto tiempo, lo que se traduce en una disminución de las tasas de infiltración promedio. Se pudo ajustar un modelo exponencial decreciente a las tasas de infiltración, alcanzándose correlaciones bastante altas. Este hecho, valida en forma teórica – experimental, la colmatación del medio poroso en el tiempo. Luego, se pudo extrapolar tasas de infiltración y tiempos de colmatación, para cada uno de los suelos.

Además, se pudo comprobar, en base a antecedentes experimentales y bibliográficos, que la colmatación del medio poroso se desarrolla plenamente y a la larga tendería a sellar el medio poroso, debido a colmatación de origen físico (filtración de sólidos suspendidos), bacteriológica (crecimiento de colonias de bacterias en el medio poroso) y química, que se produce a lo largo de toda la columna de suelo. También se observó que a medida que pasa más volumen de lixiviado por la capa arcillosa y capa de suelo natural, el efecto aumentaría por el taponamiento y crecimiento de familias de bacterias especializadas en la superficie del grano suelo.

Se comprobó que el efecto de disminución de la permeabilidad equivalente del sistema se realiza desde la parte superior a la parte inferior de la columna. Este hecho se observó en base a perfiles de conductividad hidráulica existente en la columna S₃B (la más permeable).

Se pudo apreciar que en los suelos de mayor permeabilidad las tasas de infiltración sufrían los mayores descensos, debido al mayor grado de filtración mecánica de los sólidos suspendidos, lo que quedó claramente reflejado en el caso de las columnas de arena.

Luego, integrando los antecedentes bibliográficos, análisis de los suelos, datos experimentales y supuestos en un modelo numéricos, se calibró las principales variables hidráulicas y se pudo modelar el flujo de lixiviados en la zona no saturada de manera satisfactoria, alcanzando en la mayoría de los casos excelentes ajustes de los datos medidos a los simulados en el proceso de calibración y validación. En el proceso de proyección, integrando un modelo de colmatación del medio poroso, se pudo simular el flujo de lixiviados realizando una proyección de las tasas de infiltración.

Si bien las arcillas son un elemento muy utilizado en sistemas de impermeabilización en rellenos sanitarios, por efecto de los lixiviados sufren una degradación, quedando demostrado en el trabajo experimental y en la literatura especializada, que hacen que su principal virtud, su baja permeabilidad aumente en órdenes de magnitud y no sirva como una eficaz barrera al largo plazo contra la migración de lixiviados. Este efecto es aplicable en el caso de las arcillas smectíticas (absorben gran cantidad de agua) como la bentonita. Se observó que el efecto de descomposición es en forma gradual, partiendo de la parte superior de la capa de arcilla, la que se encuentra directamente en contacto con los percolados.

Dado lo anterior, a futuro deberá estudiarse a fondo el comportamiento de diferentes tipos de arcillas, debiéndose proyectar experiencias de larga duración (5 a 10 años), utilizando técnicas de caracterización tales como: difracción de rayos X, mediciones de permeabilidad antes y después del ensayo, entre otras, que permitan datos experimentales reales para validar en forma empírica, la veracidad que la arcilla es un eficaz impermeabilizante, simulando lo más fielmente posible las condiciones existentes en rellenos sanitarios.

7.2. Comentarios y Conclusiones de Componente Calidad

En primer lugar hay que añadir que el análisis desarrollado a la parte química tiene un carácter de apoyo a la parte hidráulica, planteándose un análisis muy general de los resultados obtenidos, y será labor de un futuro trabajo la completa interpretación e integración de los datos químicos.

Por otro lado hay que mencionar que debido a las altas concentraciones de contaminantes en el suelo, las concentraciones del lixiviado son también bastante elevadas, lo que hace necesario realizar una serie de diluciones en la muestra, lo que se traduce en una mayor incertidumbre o error asociado a los resultados. Por tal razón, la interpretación de los datos debe hacerse considerando este hecho.

Se observó que a medida que mayor es la cantidad de lixiviado que pasa por un volumen de control (columna en estudio), menor es la capacidad del suelo de disminuir la concentración de algunos compuestos, como también de la disminución de la toxicidad. Esto se pudo concluir en base a análisis realizados en algunas columnas, que indicarían que a medida que pasaba el tiempo, algunos de los compuestos fueron colmatándose, alcanzando concentraciones en la parte inferior mayores que en la parte superior.

También se construyeron perfiles de concentración de la fracción soluble del suelo, aplicando un test de lixiviación francés (AFNOR X31-210), el cual permitió identificar, en función de un contraste con los valores del suelo natural (sin la presencia de lixiviado), cual es la fracción del lixiviado que es retenida como fracción soluble en el suelo. Este método permite, en forma rápida y relativamente barata, determinar si existe contaminación y cuanto de la concentración de un contaminante es retenida en el suelo.

La aplicación del test de lixiviación permitió generar una serie de perfiles de concentración, además de pH, conductividad y toxicidad de las columnas rotas. Dentro de los perfiles de concentración, se presentan los de DBO₅ y DQO, que permitieron detectar, en muchas de las columnas, un comportamiento que estaría indicando una zona dentro de la columna, donde se estaría degradando materia orgánica, debido a la presencia de microorganismos especializados, adaptados para trabajar bajo condiciones anóxicas. Este lugar de la columna se denominó *ZONA DE ACTIVIDAD MICROBIANA*.

En el caso de la columna compuesta por arena, se observó en los datos de calidad una disminución de algunos parámetros. Esto va en contradicción con la teoría. Pero al analizar los datos, se puede afirmar que la capa de arcilla es la que proporciona de alguna forma la atenuación de algunos de los componentes. Haciendo extensivo la anterior aseveración para las demás columnas, la capa de arcilla y los finos presentes en los suelos naturales, juegan un papel fundamental en la atenuación natural, por su capacidad de intercambio catiónico.

7.3. Comentarios y Conclusiones De Toxicológica

Se realizaron una serie de caracterizaciones de toxicidad de lixiviados afluentes y efluentes a algunas columnas. Al analizar los datos obtenidos por diferentes técnicas, se puede afirmar que existe algún grado de detoxificación de la fracción soluble del lixiviado en el suelo, lo que queda reflejado en una pequeña disminución de las UT (unidades tóxicas) en cada una de los ensayos. Estos resultados son sólo referenciales, ya que al igual que la componente química, existe una serie de diluciones que agregan incertidumbre a los resultados.

7.4. Conclusiones y Comentarios Finales

Se pudo calibrar, validar un modelo de flujo en la zona no saturada, para migración de lixiviados bajo rellenos sanitarios. Además, se pudo proyectar en base a modelos de colmatación avances de frente de humedad y caudales pasantes en suelos, muy útil para dimensionar fugas a través de geomembranas en el caso de rellenos sanitarios o estimar la envergadura de la contaminación en el caso de basurales o vertederos clandestinos.

El estudio se refirió a un suelo de 1 metro con una capa de arcilla reconstituida de 2.5 cm promedio, por lo que debería esperarse que todas las ventajas anteriormente expuestas se verán aumentadas con espesores de arcilla y suelo mayores.

En base a todos los antecedentes recolectados, se puede afirmar con base teórica y experimental, que la atenuación natural en suelos naturales bajo rellenos sanitarios o basurales, por el paso de lixiviados en la zona no saturada, es un proceso que se lleva a cabo tanto en la

parte hidráulica, química y toxicológica, y esta directamente relacionado con las características del suelo natural bajo el relleno o vertedero.

Con respecto la atenuación desde el punto de vista hidráulico, se asocia a una disminución de las tasas de infiltración, debido a la capacidad de filtración del suelo, por lo que dependiendo de las características del suelo y la calidad físico - química del líquido lixiviado, serán los tiempos de colmatación del sistema en su conjunto.

La capacidad de atenuación frente al paso instantáneo de percolado, está acotada en el tiempo y depende fundamentalmente del volumen de lixiviado pasante por un trozo de suelo y de las características físico-químicas y bacteriológicas del suelo en su estado inicial.

Una vez que la fuente de contaminación puntual es eliminada o como se plantea en el presente estudio, por colmatación del medio poroso las tasas de infiltración disminuyen a valores mínimos, por lo que la remediación del suelo está relacionada con la disminución de los contaminantes presentes en la fracción soluble del suelo.

El esquema de trabajo planteado en esta tesis, podría ser utilizado como guía metodológica para futuras aplicaciones en el campo del estudio de sitios contaminados. Esta metodología permitirá cuantificar e identificar los efectos medioambientales sobre la contaminación de suelos y estimar en forma el grado de contaminación presente en el suelo.

Si bien las arcillas son un muy buen impermeabilizante, hay que utilizarlo en forma conjunta con sistemas de geomembranas y geotextiles, que permitan tenerlas como un respaldo frente a una posible fuga o rotura de los elementos geosintéticos, ya que estos no poseen un vida útil infinita, y tarde o temprano, debido a esfuerzos diferenciales en el relleno, fatiga de material o simplemente que el lixiviado interactuó con las membranas, estas ceden y dejan pasar los lixiviados al suelo y posteriormente al agua subterránea.

Por otra parte, la operación de un relleno sanitario debiera partir luego de un periodo lo más seco posible, de tal manera que el suelo inmediatamente bajo el relleno sanitario tenga una mayor capacidad de amortiguamiento frente a un derrame o fuga de líquido lixiviado.

BIBLIOGRAFÍA

- Alegría, Ana Ximena. “Estudio de Arcillas como Sello de Fondo en los Rellenos Sanitarios”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile. Mayo. 1992.
- Alegría, X et all. “Comportamiento de Materiales Arcillosos como Impermeabilizantes de Rellenos Sanitarios”. XXII Congreso Interamericano de Ingeniería sanitaria y Ambiental. San Juan. Puerto Rico. 1990.
- Baghi, A. “Desing, Construction and Monitorig of Landfills”. Johns Wiley and Sons Inc. Second Edición, 1994.
- California Waste Management Board. “Procedural Guidance Manual For Sanitary Landfills”.
- Custodio, E. y F. Vilaro. “Hidrología Subterránea”. Ediciones Omega. 1976.
- Custodio J., Emilio. “Recarga Artificial de Acuíferos. Avances y Realizaciones”. Boletín Nº 45 de Informaciones y Estudios. SG (Servicio Geológico). MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo). España. 1986.
- D. Rassam, J. Šimůnek and M. Th. Van Genuchten. “Modelling Variable Saturated Flow whit HYDRUS-2D”. ND Consult. First Edition. Brisbane. Australia. 2003.
- D.S. Nº 46/02 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. “Norma de Emisión de Residuos a Aguas Subterráneas”. Publicado en el Diario Oficial el 17 de enero de 2003. Chile.
- Herrera, Paulo Andrés. “Modelación Numérica de Flujo en Medios Porosos Saturados y No Saturados”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile. Enero. 2000.
- Honorato, Ricardo. “Manual de Edafología”. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Ediciones Universidad Católica de Chile. Cuarta Edición. Enero 2000.
- IHOBE. Sociedad Pública de Gestión Ambiental. “Investigación de la Contaminación de Suelo. Guía Metodológica. Análisis Químico”. España.
- J. Šimůnek, M. Šejna and M. Th. Van Genuchten. “The HYDRUS-2D Software Package for Simulating the Two-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Satures Media”. Version 2.0. U.S Salinity Laboratory Agricultural Research Service. U.S. Deparment of Agriculture. Riverside, California. April 1999.
- Joseph J, Styles JR, Yuen STS & Cressey G. “Variations In Clay Mineral Performance In The Presence Of Leachates”. Barriers, waste mechanics and groundwater pollution, Christensen TH, Cossu R & Stegmann R (eds), Proceedings of the eighth international waste management and landfill symposium: Barriers, waste mechanics and groundwater

- pollution 3, pp 255-264. Sardinia, Italy: CISA Environmental Sanitary Engineering Centre. 2001
- Jury, William. Gardner, Wilford. Gardner, Walter. "Soil Physics". Fifth Edition. By John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. May. 1991.
 - Malean, Joan and Bledsoe, Bert. "Behavior of Metal in Soils". Ground Water Issue. USA. EPA. October. 1992.
 - Quigley, R.M., Fernandez, F. and Rowe, R.K. "Clayey barrier assessment for impoundment of domestic waste leachate (southern Ontario) including clay-leachate compatibility by hydraulic conductivity testing", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, No. 3, pp. 574-581. 1998.
 - R. Holnsteiner, ÖFPZ, AU, F. Berg, K.A. Pihl, DRI, DK, O. Hjelmar, VKI, DK, et all. PROJECT ACRONYM: ALT-MAT: Alternative materials in road construction. Contract No.: RO-97-SC.2238. Febrero 1999.
 - Recabarren, Arnaldo. "Evaluación de la Biotoxicidad de Lixiviados Provenientes de Rellenos Sanitarios". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile. Abril. 1994.
 - Schaap, Marcel. "Rosseta". <http://www.usssl.ars.usda.gov/MODELS/rosetta/rosetta.htm> . 1999.
 - S. Trottier, C. Blaise, T. Kusui, E. M. Johnson. "Acute toxicity assessment of aqueous samples using a microplate-based *Hydra attenuata* assay." Environmental Toxicology and Water Quality. Volume 12, Issue 3, pp 265-271, 1997.
 - Shackelford, Charles. "Critical Concepts for Column Testing". *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 10, pp. 1804-1828, October 1994.
 - Selker, John. Keller, C. Kent. McCord, James. "Vadose Zone Processes". Lewis Publishers. ISBN: 0-87371-953-0. USA. 1999.
 - V. Bruder-Hubscher, F. Lagarde, M.J.F. Leroy, C. Coughanowr and F. Enguehard. "Utilization of Bottom Ash in Road Construction: Evaluation of Environmental Impact". Waste Management & Research. Official Journal of ISWA (International Solid Waste Association). Volume 19. Number 6. December 2001.
 - <http://edafologia.ugr.es/>. "Curso de Edafología Online". Departamento de Edafología y Química Agrícola. Unidad docente e investigadora de la Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. España.
 - Vallejos, Julio Roberto. "Elaboración de Bases de Diseño Tratamiento Suelo Acuífero (SAT). Aplicación Caso Copiapó". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile. Septiembre. 2001.

ANEXOS

ANEXO 1
MODELOS DE CURVA DE SUCCIÓN

ANEXO 1: MODELOS DE CURVA DE SUCCIÓN

A continuación se presentan una serie de expresiones que representan $K(\theta)$, $h(\theta)$, $\theta(h)$ y $D(\theta)$.

Expresión	Referencia
$D\left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0}\right) = \frac{K_s h_c (1 - \beta)}{(\theta_s - \theta_r) \left(1 - \beta \left[\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0}\right]^2\right)}$ <p style="text-align: right;">Con $0 < \beta < 1$</p>	Fujita (1952)
$K(h) = K_s \exp(\alpha h)$	Gardner (1958)
$K(h) = \frac{K_s}{h^n + b}$ <p style="text-align: right;">Con $1 < n < 4$</p>	Gardner (1958)
$\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_b}\right)^b}$	Brutsaert (1966)
$D(\theta) = \frac{D_0 (n + 1) \theta^n}{n} \left(1 - \frac{\theta^n}{n + 1}\right)$ <p style="text-align: right;">Donde $D_0 = D(\theta_s)$</p>	Brutsaert (1968)
$K(h) = K_s \exp[\alpha(h - h_0)]$ <p style="text-align: right;">Si $h < h_0$</p> $K(h) = K_s$ <p style="text-align: right;">Si $h \geq h_0$</p>	Ritgema (1965)
$\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} = \left(\frac{h_{cr}}{h}\right)^\lambda$ <p style="text-align: right;">Si $h < h_0$</p> $\theta = \theta_s$ <p style="text-align: right;">Si $h \geq h_0$</p> $K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0}\right)^\eta$ <p style="text-align: right;">Si $h < h_0$</p> $K(h) = K_s$ <p style="text-align: right;">Si $h \geq h_0$</p> <p>Donde</p> $\eta = \frac{2}{\lambda} + 3$	Brooks and Corey (1964)

Expresión	Referencia
$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \right)^{1/2} \left[\frac{\int_0^\theta \frac{d\theta'}{h}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta''}{h}} \right] \text{ para cualquier función } \theta(h)$ <p>Donde θ' y θ'' son variables mudas de integración.</p>	<p>Mualem (1976)</p>
$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \right)^2 \left[1 - \gamma \frac{\int_0^\theta D(x) dx}{\int_0^{\theta_s} D(y) dy} \right] \quad \text{donde } 0 \leq \gamma \leq 1$ <p>Donde x e y son variables mudas de integración.</p>	<p>Parlante et al. (1985)</p>
$\theta(h) = \theta_a + \frac{\theta_m - \theta_a}{(1 + \alpha h ^n)^m} \quad \text{Si } h < h_0$ $\theta = \theta_s \quad \text{Si } h \geq h_0$ $K(h) = \begin{cases} K_s K_r(h) & h \leq h_K \\ K_K + \frac{(h - h_K)(K_s - K_K)}{h_s - h_K} & h_K \leq h \leq h_s \\ K_s & h \geq h_s \end{cases}$ <p>Donde</p> $K_R = \frac{K_K}{K_s} \left[\frac{S_e}{S_{ek}} \right]^\ell \left[\frac{F(\theta_r) - F(\theta)}{F(\theta_r) - F(\theta_K)} \right]^2$ $F(\theta) = \left[1 - \left[\frac{\theta - \theta_a}{\theta_m - \theta_a} \right]^{1/m} \right]^m$ $S_{ek} = \frac{\theta_K - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	<p>Vogel and Císlerová (1988)</p>

Expresión	Referencia
$\theta = \theta_0 + \left(\frac{\theta_s - \theta_0}{2} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln(h_c - h) / (h_c - h_0) - \sigma^2}{2^{1/2} \sigma} \right) \quad \text{Si } h < h_0$ $\theta = \theta_s \quad \text{Si } h \geq h_0$	Kosugi (1994)
<p>Si se coloca la expresión anterior en la ecuación de Mualem se obtiene la siguiente expresión</p>	
$K(h) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_s - \theta_0} \right)^2 \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2^{1/2} \sigma} \ln \left(\frac{h}{h_0} \right) \right) \right]^2$	Das and Kluitenberg (1995)

ANEXO 2

MONITOREO DE LA ZONA NO SATURADA, MANIPULACIÓN DE MUESTRAS Y TEST DE LIXIVIACIÓN

ANEXO 2: MONITOREO DE LA ZONA NO SATURADA, MANIPULACIÓN DE MUESTRAS Y TEST DE LIXIVIACIÓN

A2.1 Monitoreo De La Zona No Saturada

La zona no saturada se divide en tres regiones: el suelo natural, la zona intermedia y la zona de ascenso capilar, las cuales se pueden apreciar en la Figura A2.1. El movimiento del agua en el suelo, generalmente comienza como infiltración o percolación de aguas lluvias o agua que se encuentre en la superficie del suelo.

El espesor de la zona no saturada no es necesariamente constante. El bombeo de la zona saturada puede bajar la ubicación del nivel del agua, al igual que las condiciones de recarga y periodo del año, y modificar por lo tanto, el espesor de la zona no saturada.

Debido a la ubicación de la zona no saturada, cualquier contaminante que se genere cerca de la superficie del suelo pasa por la zona no saturada y llega finalmente a las aguas subterráneas. En el caso de rellenos sanitarios, el monitoreo de la zona no saturada provee una alarma temprana, antes de que se produzca la contaminación de la zona saturada.

El monitoreo de la zona no saturada no es la panacea para todas las condiciones hidrogeológicas o para todos los sitios de ubicación de rellenos sanitarios. Por ejemplo, en lugares donde el nivel de aguas subterráneas es muy somero (3 a 5 metros bajo el nivel del suelo), el monitoreo de la zona no saturada no es efectivo, debido a que el tiempo de respuesta entre el escape de la contaminación y la detección de la contaminación es muy corto.

Una restricción adicional es el hecho que muchos de los sistemas de tomas de muestras de la zona no saturada, excepto la toma de muestra directa de suelo, no trabajan bien a profundidades mayores de 15.2 metros (50 feet) bajo la superficie del suelo. Otros factores que afectan estos sistemas son:

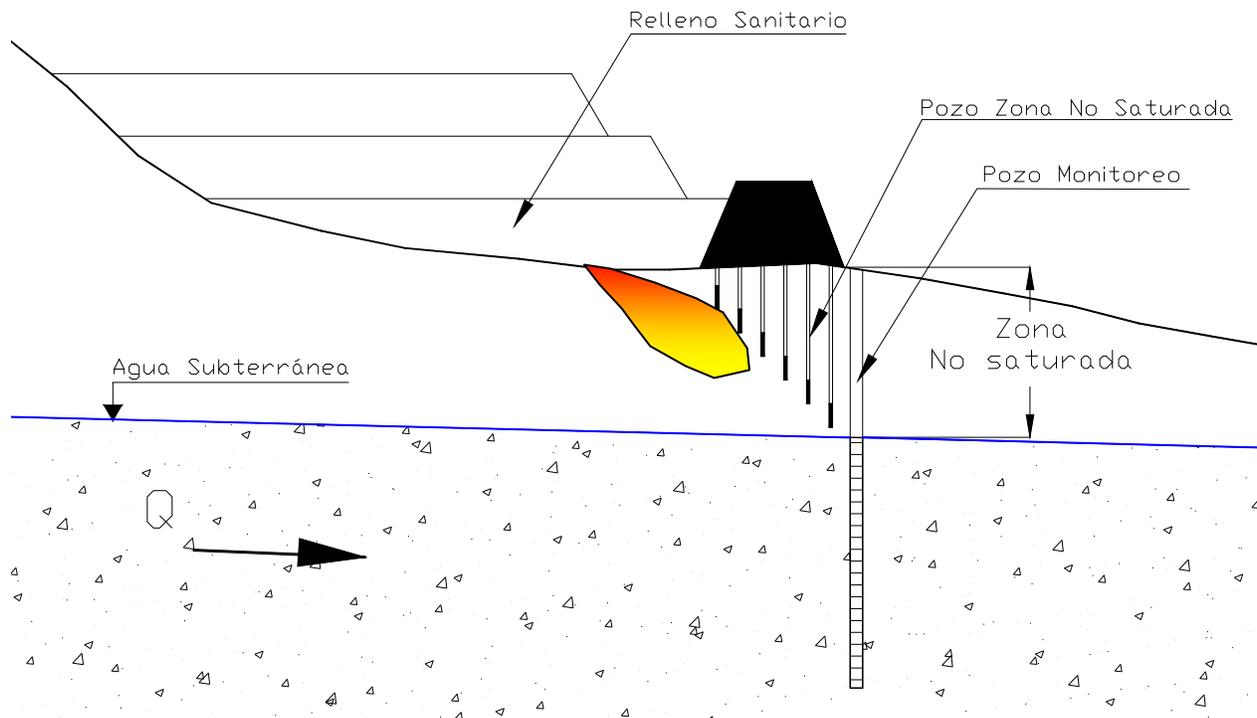
- Propiedades físicas del suelo.
- Factores hidráulicos.
- Interacciones entre el receptáculo del instrumento muestreador de la prueba y el lixiviado.
- Factores climáticos.

En el caso particular de un relleno sanitario, un plan de monitoreo debería considerar monitoreo tanto en la zona vadosa como en la zona saturada, tal como se muestra en la Figura 2.7. Si nos referimos solamente al monitoreo de la zona no saturada, tenemos que existen dos clases de procedimientos para identificar lixiviado que se fuga desde un relleno o vertedero de basura: i) monitoreo del suelo ii) monitoreo del líquido dentro del suelo.

En el primero de los procedimientos, la muestra se obtiene mediante perforación hasta la profundidad requerida, teniendo los cuidados pertinentes para sacarla a la superficie. Luego deberá ser llevada en un contenedor adecuado al lugar donde se le desarrollarán los análisis estándares como densidad, contenido de humedad, granulometría, porosidad y permeabilidad. Además, deberá realizarse una descripción visual de la apariencia física de una de la muestra de

suelo obtenidas en campo, de tal manera de generar el perfil de suelo e identificar el avance de la posible contaminación.

Figura A2.1
Esquema de Monitoreo en Rellenos Sanitarios



Fuente: Elaboración propia.

Una de las principales desventajas de este método de detección de lixiviados en torno a un relleno sanitario, son los elevados costos de perforación y el hecho que la reproducción exacta de los resultados en otro sitio es imposible ya que el mismo volumen de suelo no puede ser remuestreado.

El otro procedimiento corresponde al monitoreo de las aguas presentes en el suelo no saturado. Se realiza mediante un vaso poroso que se instala en lisímetros, al cual se le induce una presión negativa, para que el agua presente en el suelo se introduzca por la cerámica y sea llevada a la superficie. Este procedimiento de succión se realiza debido a que el agua presente en los poros no tiene la suficiente presión para fluir a la cerámica porosa. La muestra recolectada del lisímetro es una muestra fidedigna del agua presente en la zona no saturada.

Uno de los principales problemas de este método, se presenta en suelos donde el contenido de humedad es muy bajo, ya que no es posible obtener muestras con este método. Además, se presentan frecuentemente, dependiendo de la cantidad de partículas o materia orgánica disuelta en el tiempo de recolección de muestra, la colmatación del vaso poroso recolector del lisímetro. Uno de los factores limitantes de este método son las profundidades máximas de ubicación de los lisímetros.

Una vez en el laboratorio las muestras se le realizarán test estándar de constituyentes orgánicos e inorgánicos que pueden ser extraídos de la muestra, para dar una indicación acerca de los contaminantes presentes en los intersticios entre los granos de suelos. Para estos efectos, de extraer la fracción soluble de los suelos contaminados, existen una serie de ensayos estandarizados, que se presentarán en el desarrollo del presente trabajo.

A2.2 Técnicas de Obtención de Muestras en la Zona No Saturada

Las técnicas de muestreo de la zona no saturada se dividen en tres partes: muestreo en fase sólida, muestreo en fase líquida y muestreo en fase gaseosa. En este trabajo abordaremos el muestreo en la fase sólida y líquida.

A2.2.1 Fase Sólida Zona No Saturada

El muestreo de la fase sólida, nos permite la caracterización física, química, hidrogeológica y toxicológica del suelo o perfil de éste. Los principales sistema de muestreos intrusivos para el estudio de suelos son los siguientes: calicatas, sondajes manuales, sondajes ligeros y sondajes mecánicos. En cada uno de los sistemas antes mencionados, se debe velar porque la realización del ensayo garantice la representatividad de las muestras.

Las calicatas son generalmente realizadas con máquina y se pueden alcanzar profundidades de entre 5 y 10 metros de profundidad, dependiendo del tipo de máquina que se emplee. Esta técnica es utilizada para determinar áreas y delimitación horizontal de zonas contaminadas. Es una técnica rápida y económica, que permite obtener resultados de las primeras capas de suelos en poco tiempo a costos reducidos, pero la desventaja que presenta es que limita la investigación a capas superiores de suelo. Permite visualizar *in situ* las condiciones y estratigrafías del terreno (perfiles, color, humedad, grado de compactación).

Los sondajes manuales están limitados a la dureza del suelo, no siendo aplicables a suelos rocosos o excesivamente pedregosos. Su principal ventaja es su bajo costo. Las profundidades promedios que se pueden alcanzar bordean los 5 metros. Se pueden utilizar diferentes sondas, tales como:

- Sonda de embudo: todo tipo de suelo y muestras superficiales.
- Sonda *Edelman*: todo tipo de suelos, muestra extraída presenta poca alteración. Profundidades máximas de muestreo 5 metros.
- Sonda Manual de media caña: aplicable a terrenos blandos y húmedos en suelos cohesivos. Profundidades máximas de muestreo 1.45 metros.
- Sonda manual “*Riverside*”: aplicable a terrenos duros y compactos, que presentan gravas finas entre sus constituyentes. Grado de alteración de la muestra es medio. Profundidades máximas de muestreo 1.25 metros.
- Sondas para gravas: Se utiliza para suelos con alto contenido de gravas.
- Sonda para suelos arenosos: apropiado para suelo con mínimas propiedades cohesivas.

Los sondajes ligeros representan un escalón intermedio entre los manuales y los mecánicos. La diferencia con los sondajes manuales radica en que al equipo se le suministra una fuerza motriz accesoria.

Los sondajes mecánicos aplicados a la investigación de suelos no son siempre un problema sencillo ya que necesitan de un gran despliegue logístico y sus costos son elevados. El mismo sondaje, posteriormente puede ser aprovechado como pozo de observación. Una de las técnicas más desarrolladas en las investigaciones de sitios contaminados corresponde a los sondajes realizados con rotación y coronas de perforación y en menor grado de percusión y rotación con barrenas helicoidales. Las muestras pueden obtenerse en forma de testigos o de detritus. Los testigos son trozos completos del perfil perforado, tienen una forma cilíndrica alargada y generalmente el grado de alteración mecánica es baja o media. Los detritus, también denominados ripios o “*cuttings*” son trozos pequeños del terreno, por lo que el grado de alteración mecánica es muy elevado.

A2.2.2 Fase Líquida Zona No Saturada

El muestreo de la zona no saturada se debe realizar con precaución de manera de no afectar las aguas subterráneas, por la creación de vías preferenciales a través de la zona contaminada. Los medios más habituales de extracción de muestra de agua a partir de los suelos, se fundamentan en la succión o vacío aplicado al suelo.

Los equipos a utilizar quedan definidos por: tipo y características del suelo, profundidad de muestreo y volumen de muestra requerido de muestra, entre otros. Dentro de los equipos más utilizados para el muestreo de la zona no saturada, tenemos:

- **Lisímetros:** son cilindros tubulares de pequeño diámetro con el extremo usualmente acoplado a una cerámica porosa. Esta cerámica sirve de filtro para que pase la humedad del suelo al interior del instrumento. El sistema que utilizan para introducir la humedad dentro del tubo es una succión, o una succión seguida de una descarga.
- **Filtros de membrana:** son filtros compuestos por celulosa – acetato que van unidas a tiras o mechas de fibra de vidrio y colectores. Funcionan en forma pasiva bajo el principio de capilaridad. Se pueden utilizar hasta profundidades de hasta 4 metros.
- **Cajas o varillas porosas:** son recipientes que son pesados antes de su introducción en el suelo y tras su posterior extracción, para determinar el volumen de agua extraído. Después son sometidos a evolución en un volumen de agua destilada conocida, consiguiéndose la lixiviación del agua retenida.

A2.3 Manipulación de las Muestras

La manipulación de las muestras in situ es fundamental para conservar la integridad de las mismas, tanto en la calidad física, química, bacteriológica y toxicológica. Para cumplir con lo anterior, se deben elegir en forma adecuada los procedimientos de extracción, receptáculos que van a contener las muestras y poner bastante atención en los métodos de conservación, ya sea de suelo o del líquido ubicado en la zona no saturada.

Dentro de los puntos importantes a considerar al momento de realizar una campaña de monitoreo de suelo y agua, corresponde al transporte y almacenamiento de las muestras. Dentro de los principales puntos a considerar tenemos:

- Adecuados envases y rotulación.
- Considerar la “cadena de custodia” de la muestra.
- Debe reducirse al mínimo el tiempo entre la toma de muestra y el análisis.

Los recipientes deben tener el tamaño adecuado para el volumen de muestra a extraer, como así también ser sellables, herméticos, resistentes y permitir un fácil etiquetado. Además, los envases elegidos deben tomar en cuenta que no debe interactuar con la muestra de suelo o agua, que pueda contaminar la muestra.

Dentro de los envases más utilizados para la conservación de suelos, tenemos: bolsas de polietileno, frascos de plástico, frascos de vidrio y frascos recubiertos de plástico, entre los más comunes.

En el caso particular de las muestras de suelo, deben utilizarse bolsas de plástico cuando los analitos a estudiar sean de naturaleza inorgánica, mientras que los contaminantes a estudiar sean de naturaleza orgánica se deberá preferir la utilización de envases de vidrio.

En el caso de la preservación de las muestras de suelo, las técnicas más utilizadas son la refrigeración y el almacenamiento en la oscuridad para minimizar la pérdida de compuestos volátiles y la actividad microbiológica. Otra técnica que es aplicable a la conservación de los compuestos orgánicos volátiles, es la saturación de la muestra en metanol.

En el caso del suelo, existen parámetros como los metales pesados con un tiempo de conservación relativamente largo en la muestra, pero existen una serie de parámetros que poseen un tiempo de conservación máximo de preservación, los cuales se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla A2.1

Tiempo Aproximado que Pueden Mantenerse una Muestra Inalterada de Suelo en Función de los Parámetros a Determinar (A 4°C y en Oscuridad)

Parámetro Químico a Determinar	Tiempo Máximo de Conservación [Días]
Aceite Mineral	4
Hidrocarburos Policíclicos aromáticos (PAHs)	4
Pesticidas organoclorados	10
Hidrocarburos organohalogenados extraíbles (EOX)	10
Compuestos orgánicos Volátiles (VOCs)	1

Fuente: IHOBE. “Investigación de la Contaminación de Suelo. Guía Metodológica. Análisis Químico”. España.

A2.4 Test De Lixiviación De Muestras De Suelo Contaminadas

Un test de lixiviación es una herramienta que permite extraer del suelo, a través de procesos de lavado y/o digestión, contaminantes orgánicos e inorgánicos, materia orgánica, bacterias y virus,

para estudiar la calidad física, química, bacteriológica y toxicológica de suelos naturales y contaminados.

Existen diversos test de lixiviación para diversos tipos de suelos. Los más comunes corresponden a suelos granulares, dentro de los que se clasifican en dos tipos: en condiciones de equilibrio o cuasi equilibrio y en condiciones de desequilibrio (test dinámicos).

Cabe señalar que para la interpretación de los resultados de los test de lixiviación, se realiza el supuesto que existen condiciones de equilibrio en régimen permanente entre el sólido y la fase líquida con respecto al tiempo de contacto. En el caso de los test de lixiviación en columnas, se da el equilibrio a la salida para tasas de infiltración pequeñas, pero si se analiza especial y temporalmente, las condiciones de equilibrio varían.

Algunos de los más comunes test de lixiviación de desechos granulares y de lodos industriales se presentan en la Tabla A2.2.

Dentro de los procedimientos de lixiviación del tipo batch se encuentran: DIN 38414 S4 (Alemania), AFNOR X31-210 (Francia), JST-13 (Japón), NEN 7349 Serial Batch Test (Suecia), ENA Skaktest (Suiza), TVA-Eluattest (Inglaterra), WRU Batch Extraction (USA), EP Tox Method 1310 (USA) y TCLP Method 1311 (USA).

Tabla A2.2
Diferentes Test de Lixiviación de Suelos Granulares y Lodos Industriales

Tipo de Test	Condiciones	Observación
Test de lixiviación en columnas	Equilibrio	Puede llegar a ser dinámico para grandes tasas de flujo y/o a suelos granulares
Test de lisímetros	Equilibrio	
Test de extracción Batch: <ul style="list-style-type: none"> • Test de lixiviación simple. • Test de lixiviación múltiple. • Test de lixiviación a pH fijo. • Test de oxidación • Test de extracciones especiales 	Equilibrio	Puede llegar a ser dinámico para pequeños tiempos de contacto y/o tamaños de partículas grandes.
Test combinados de columnas con test batch	Equilibrio	Puede llegar a ser dinámico para pequeños tiempos de contacto y/o tamaños de partículas grandes.
Tets de lixivación de tanque para suelos granulares.	No Equilibrio	

Fuente: Alternative materials in road construction. Contract No.: RO-97-SC.2238. Febrero 1999.

La mayoría de los test presentados se basan en el DIN 38414 S4 el cual es considerado a aplicarse a suelos, pastes y lodos de desechos de industrias. Este método no simula condiciones de campo. El material testeado debe ser menor a 10 mm. Este es extraído en una relación de Líquido/Sólido = 10 litros/kilogramo por 24 horas con agua desmineralizada con movimientos (shaking) o rotación lenta.

El test estandarizado de lixiviación AFNOR X31-210 fue concebido para desechos minerales granulares sólidos en 1988. Éste test de extracción se basa en el DIN y también usa agua desmineralizada (resistividad $< 0.2 \text{ M}\Omega \text{ cm}$) en una razón de Líquido/sólido = 10 litros/kilo bajo un movimiento de 60 rpm (amplitud de $3 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm}$) por 24 horas (16 horas en cada uno de los dos test adicionales). Los tamaños de las partículas deben ser menores a 4 mm. El pH no es controlado en este test. El test debe ser realizado a una temperatura media de $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Una vez terminado el test, el agua de lavado debe ser filtrada a través de un filtro de $0.45 \text{ }\mu\text{m}$ y si es posible centrifugación con filtración avanzada. Este test puede ser utilizado, tanto para análisis físico-químicos, como ecotoxicológicos de la fracción soluble del lixiviado de la muestra. Algunas de las ventajas de este método son su simpleza y rapidez.

Las condiciones de laboratorio aplicadas para la realización del test AFNOR X31-210 fueron las siguientes:

- Utilización de agua destilada. Se midió la conductividad del agua destilada y ésta varió entre $4.6 \text{ }\mu\text{S}$ y $3.5 \text{ }\mu\text{S}$, con el pH en torno a los 5.1. La norma considera la utilización de agua desionizada, por lo que el agua utilizada cumple con creces la normativa.
- Se utilizaron 100 gramos de suelo por 1 litro de agua destilada.
- Se utilizó un agitador de movimientos horizontales, con una amplitud máxima de 5 cm. Amplitud máxima recomendada $3 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm}$, con una agitación de 60 rpm (Ver Anexo 5).

ANEXO 3
ALBUM DE FOTOS

ANEXO 3: ALBUM DE FOTOS

Figura A3.1
Etapa de Construcción Instalación Experimental



Figura A3.2
Llenado de las Columnas Experimentales



Figura A3.3
Llenado de las Columnas Experimentales



Figura A3.4
Instalación Experimental Operando

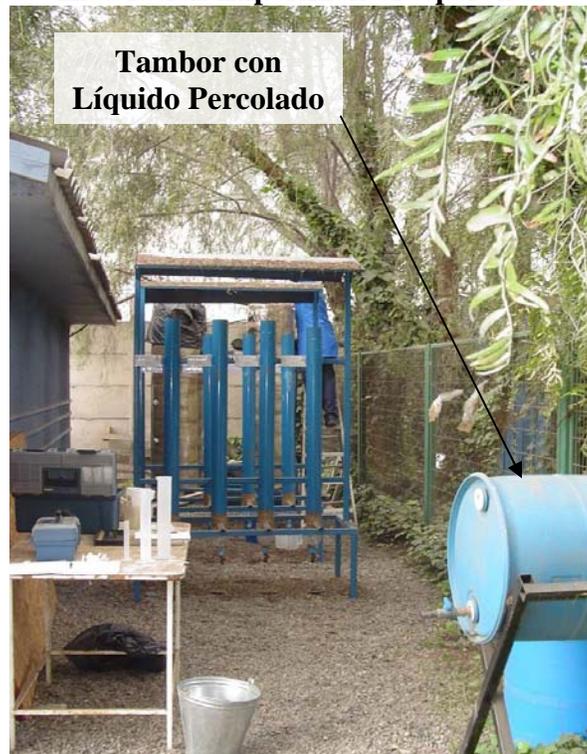


Figura A3.5
Sistemas de Recolección de Percolados



Figura A3.6
Medición Semanal de Niveles



Figura A3.7
Perfil de Suelo En Receptáculo y Botellas Donde se Realiza Test AFNOR X31-210



Figura A3.8
Horno de Secado de las Muestras



Figura A3.9
Agitador de las Muestras con Sistema de Refrigeración Motor



Figura A3.9
Determinación de Humedad Mediante Balanza Analítica



ANEXO 4
PERFILES DE CARGA DE CONTAMINANTES

ANEXO 4: PERFILES DE CARGA DE CONTAMINANTES

Figura A4.1

Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₁B

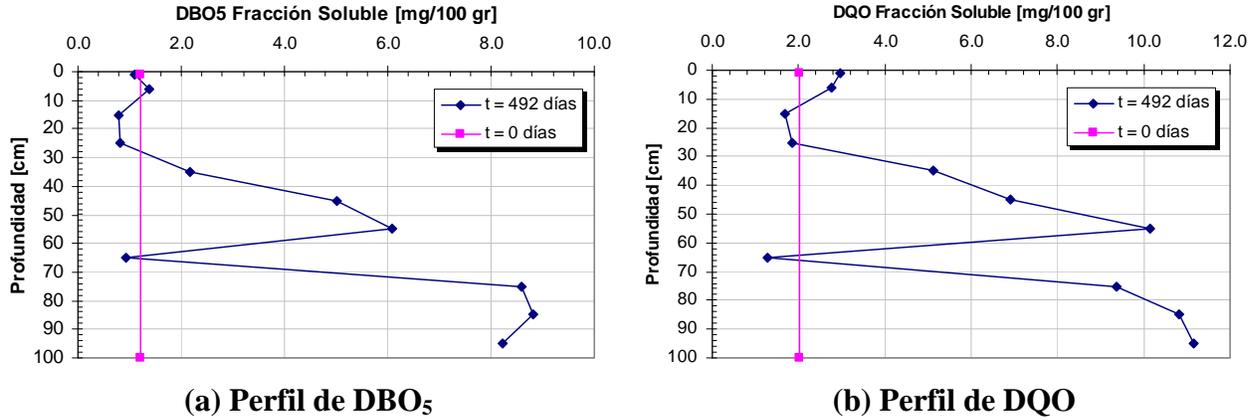


Figura A4.2

Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₁B

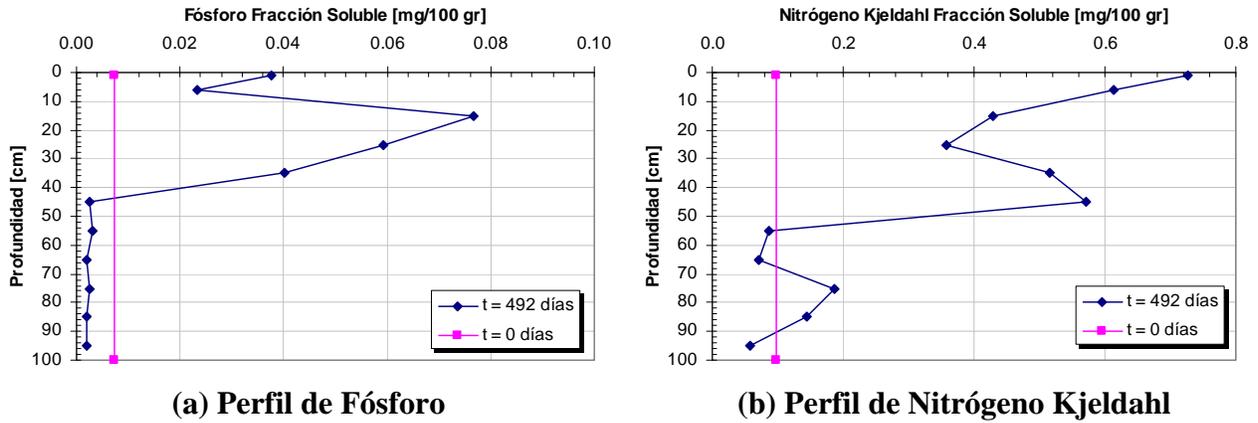


Figura A4.3

Perfiles de Conductividad y pH del Lixiviado de Columna S₁B

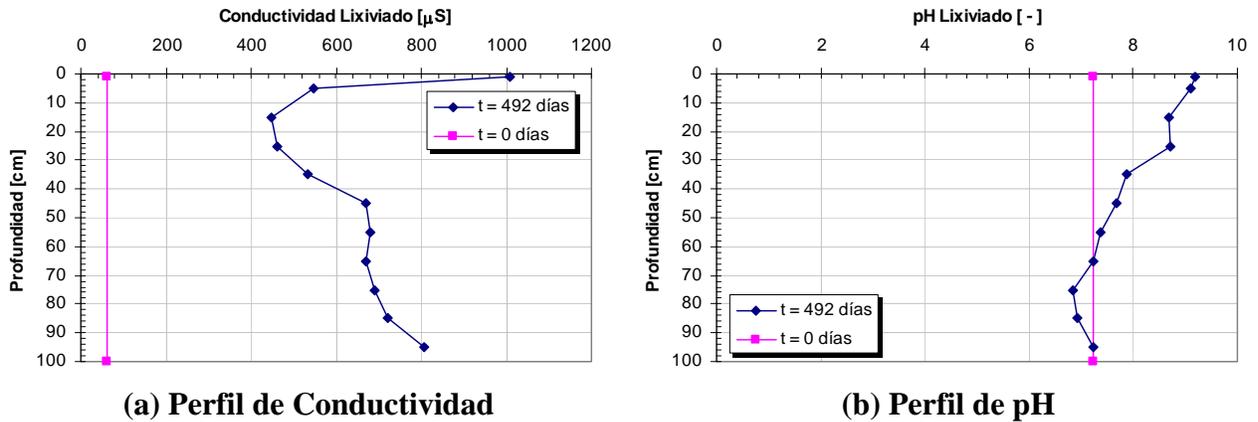
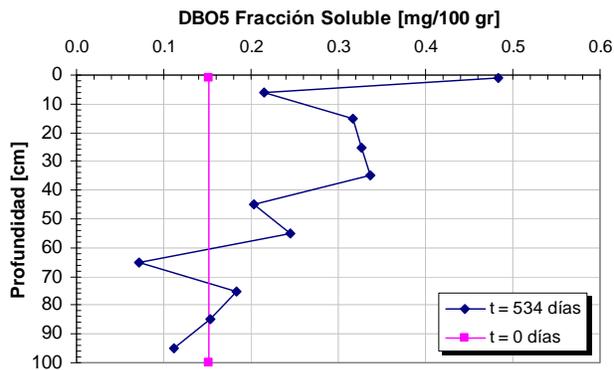
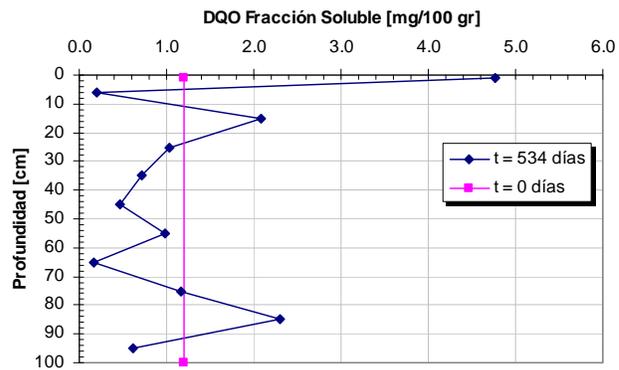


Figura A4.4
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₂B

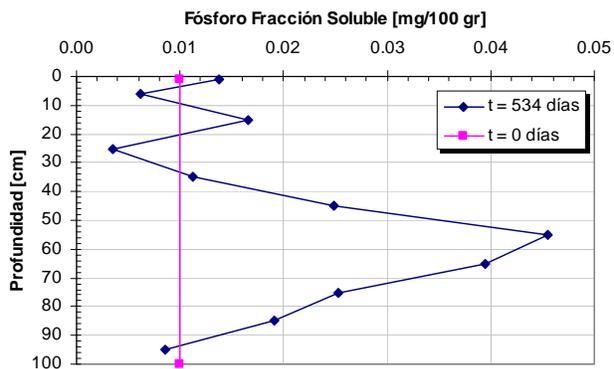


(a) Perfil de DBO₅

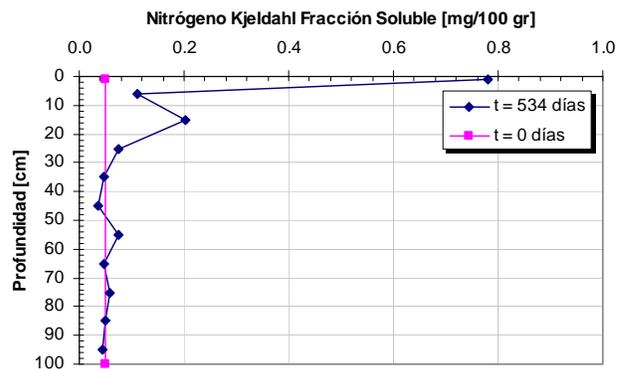


(b) Perfil de DQO

Figura A4.5
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₂B

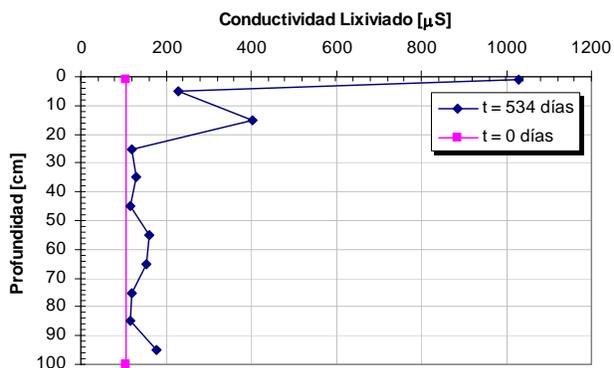


(a) Perfil de Fósforo

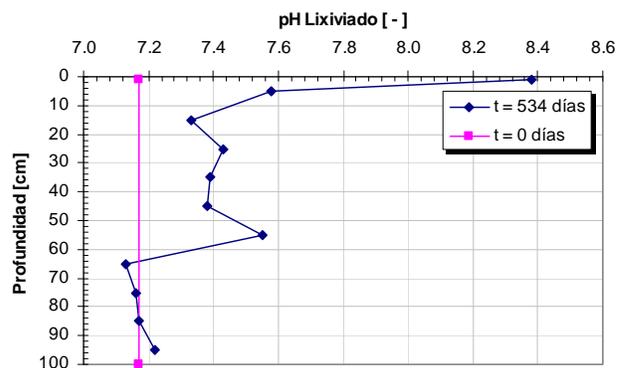


(b) Perfil de Nitrógeno Kjeldahl

Figura A4.6
Perfiles de Conductividad y pH del Lixiviado de Columna S₂B



(a) Perfil de Conductividad



(b) Perfil de pH

Figura A4.7
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₄B

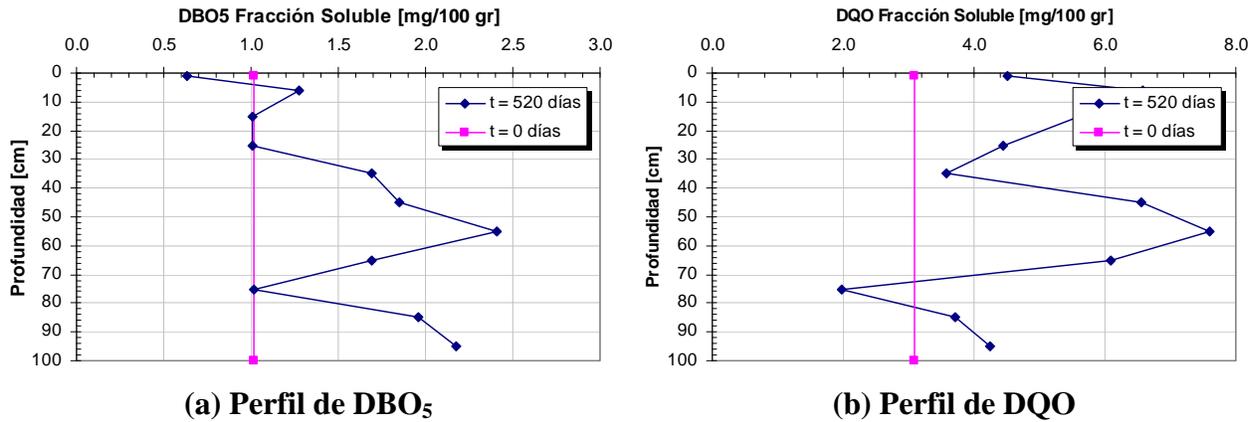


Figura A4.8
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₄B

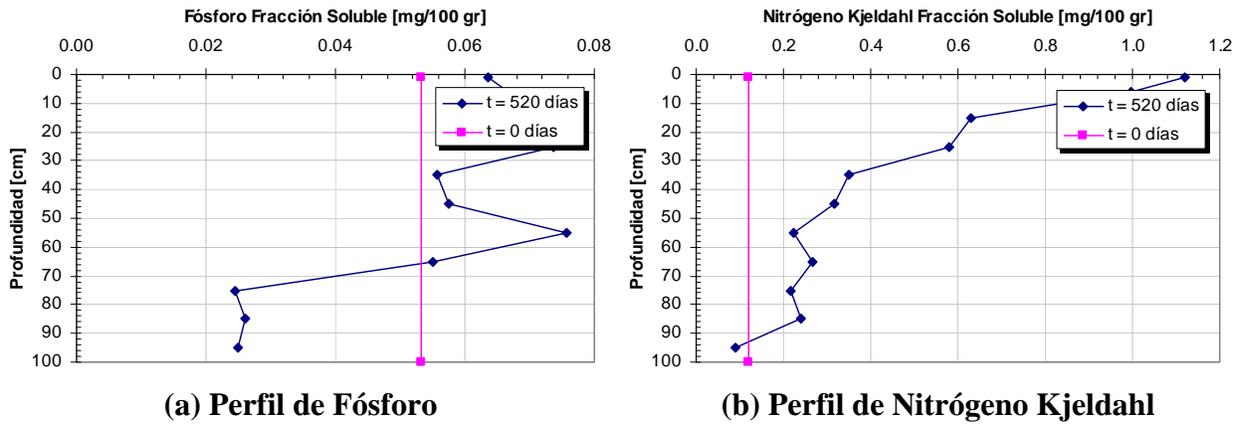


Figura A4.9
Perfiles de Conductividad y pH del Lixiviado de Columna S₄B

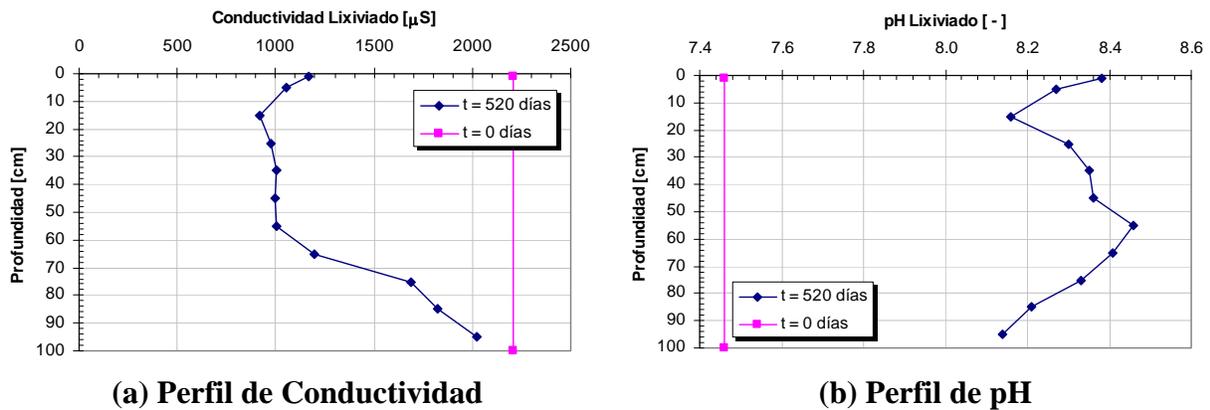
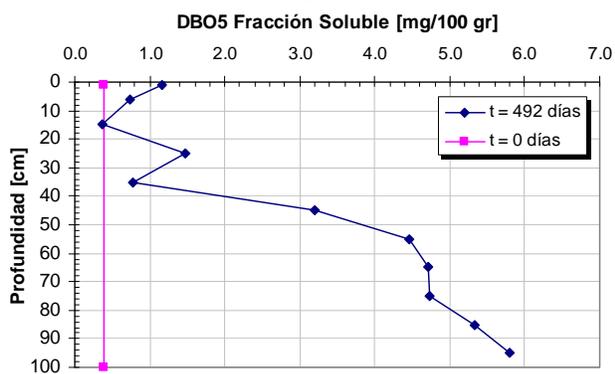
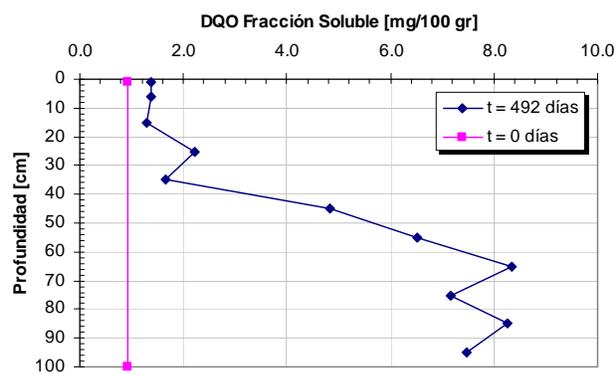


Figura A4.10
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₅A

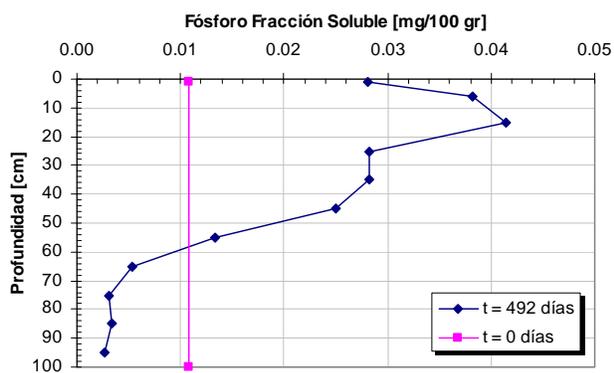


(a) Perfil de DBO₅

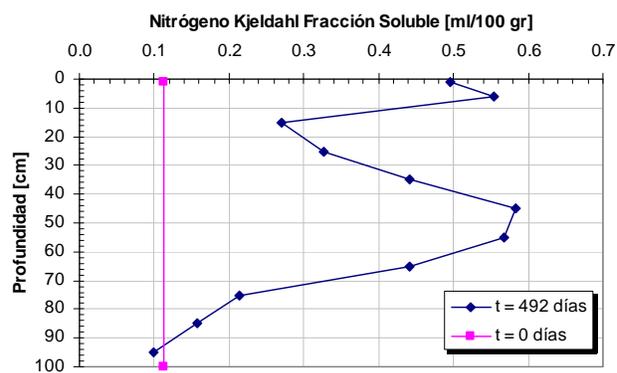


(b) Perfil de DQO

Figura A4.11
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₅A

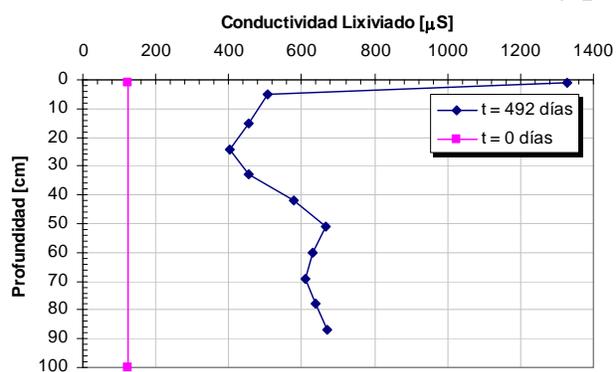


(a) Perfil de Fósforo

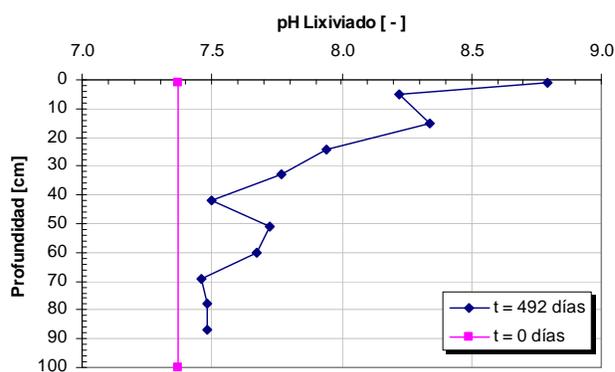


(b) Perfil de Nitrógeno Kjeldahl

Figura A4.12
Perfiles de Conductividad y pH del Lixiviado de Columna S₅A



(a) Perfil de Conductividad



(b) Perfil de pH

Figura A4.13

Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₆A

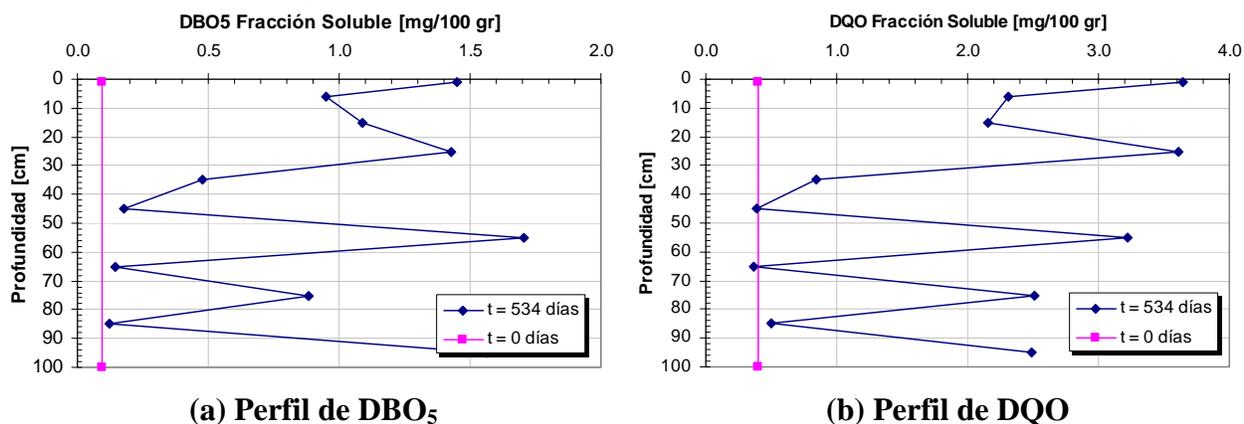


Figura A4.14

Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₆A

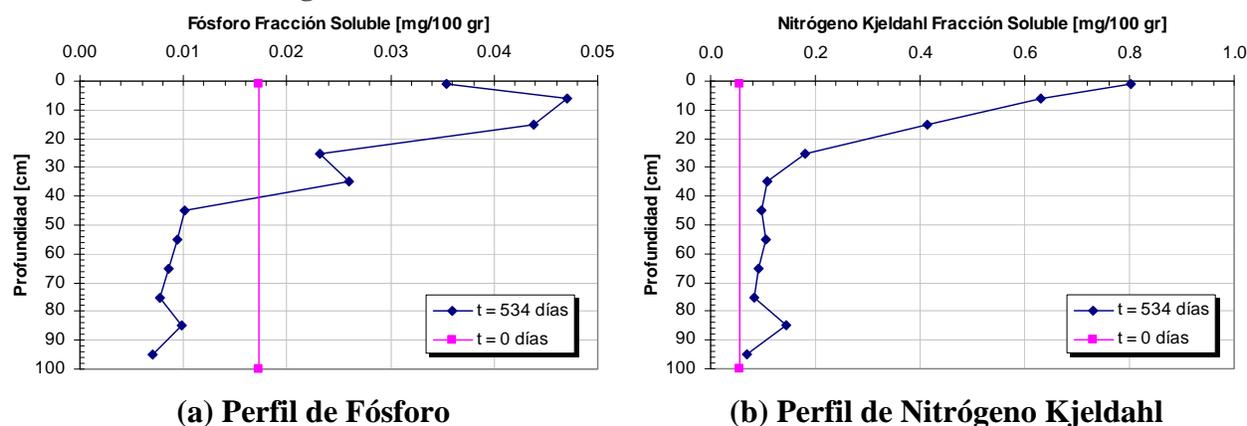


Figura A4.15

Perfiles de Conductividad y pH del Lixiviado de Columna S₆A

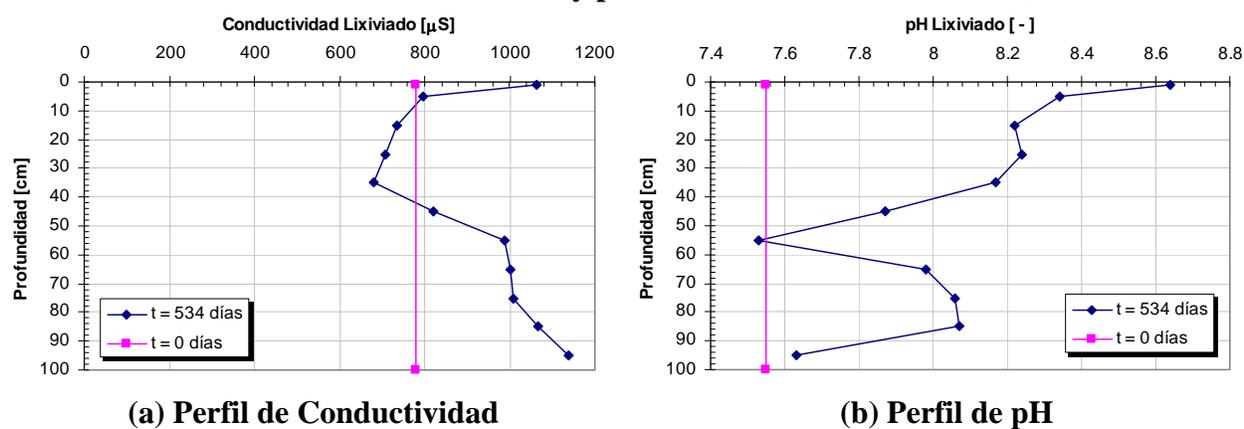
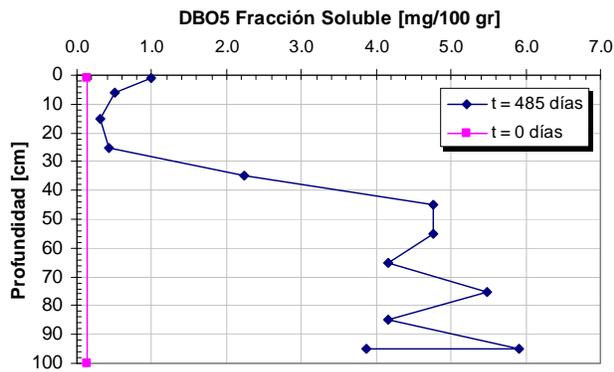
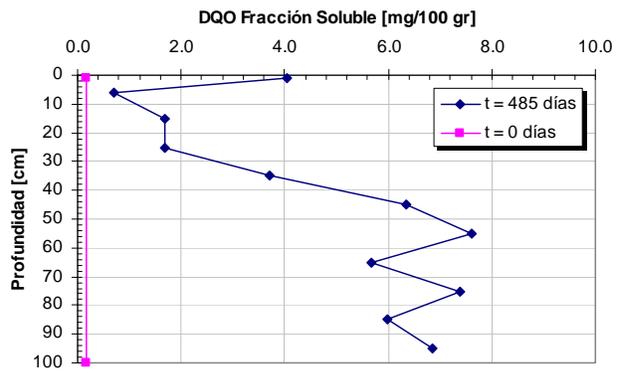


Figura A4.16
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₇A

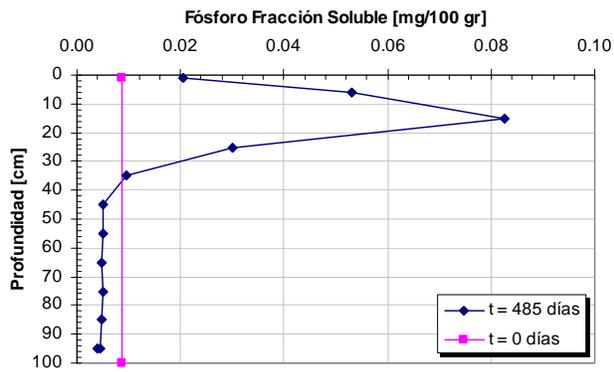


(a) Perfil de DBO₅

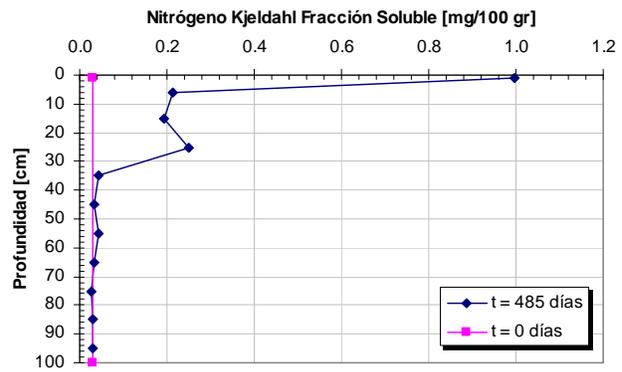


(b) Perfil de DQO

Figura A4.17
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₇A

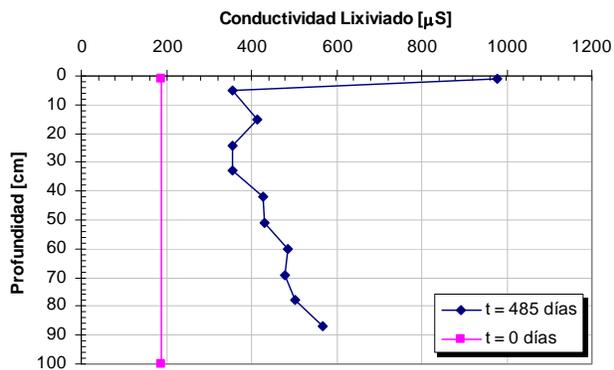


(a) Perfil de Fósforo

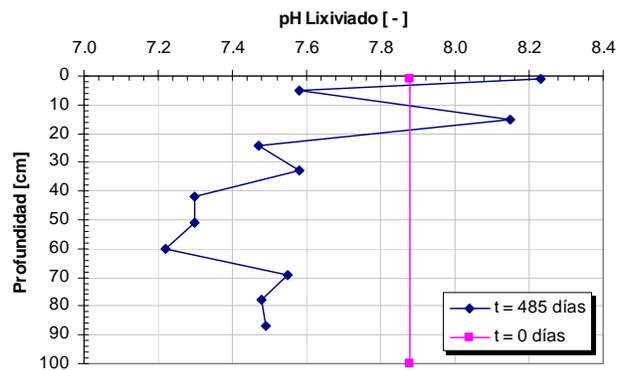


(b) Perfil de Nitrógeno Kjeldahl

Figura A4.18
Perfiles de Conductividad y pH del Lixiviado de Columna S₇A

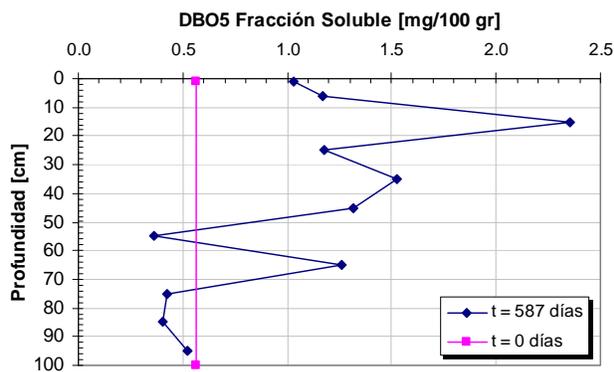


(a) Perfil de Conductividad

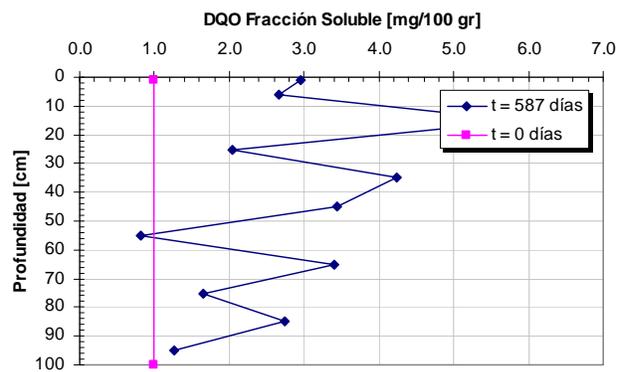


(b) Perfil de pH

Figura A4.19
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₈A

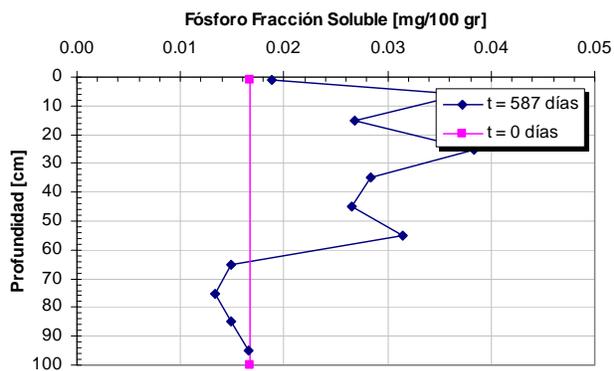


(a) Perfil de DBO₅

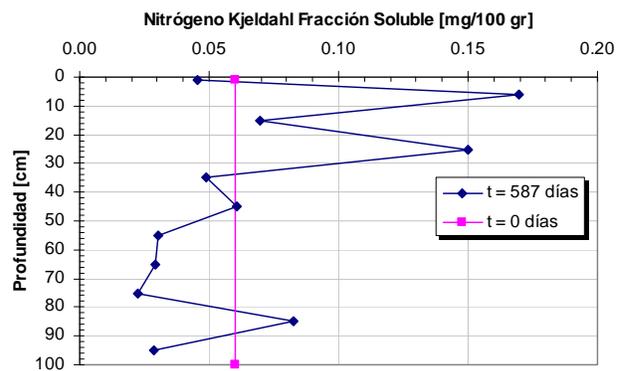


(b) Perfil de DQO

Figura A4.20
Perfiles de Carga de Contaminante en Fracción Soluble del Suelo Columna S₈A

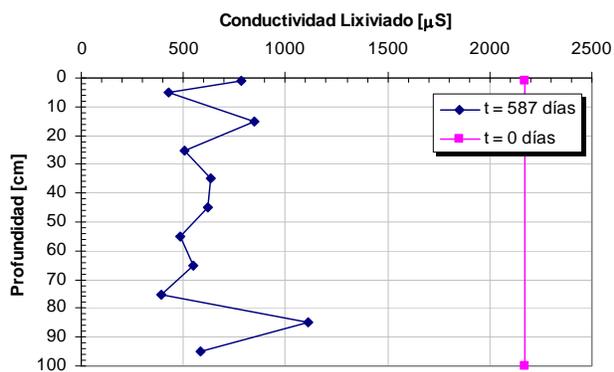


(a) Perfil de Fósforo

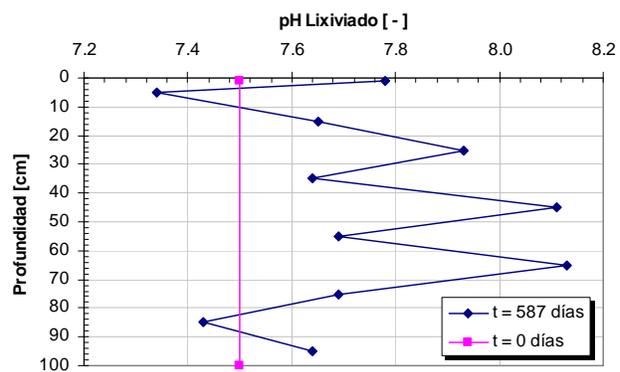


(b) Perfil de Nitrógeno Kjeldahl

Figura A4.21
Perfiles de Conductividad y pH del Lixiviado de Columna S₈A



(a) Perfil de Conductividad



(b) Perfil de pH

ANEXO 5
PERFILES DE BACTERIAS Y TOXICOLÓGICOS

ANEXO 5: PERFILES DE BACTERIAS Y TOXICOLÓGICOS

Se realizaron tres perfiles de recuento de bacterias heterótrofas, como también de toxicidad en la vertical de la fracción soluble de los suelos contaminados. Dos de ellos, en las columnas más permeables y el otro en la más impermeable, a modo de tener los extremos en cuanto a permeabilidad en el medio poroso. *Hay que hacer notar, que la técnica de recuento se enfoca a bacterias heterótrofas aeróbicas potenciales de ser cultivadas en un medio.* Este número siempre entrega órdenes de magnitud menor que el total que se pudiese encontrar en un suelo, debido a que el medio de cultivo que se utiliza no posee las características óptimas para el crecimiento de todas las bacterias.

En el caso particular del presente estudio, las bacterias que se encuentran en el suelo, son mayoritariamente anaeróbicas facultativas, por lo que el cultivo de bacterias se utilizará como una antecedente más a considerar.

Al analizar dos de las columnas S₃B y S₈A, el nivel de puntos tomados para la realización de recuentos de bacterias y tóxicos fue de poca resolución, debido a que no se sabía con que rango se moverían los diferentes parámetros, por lo que se optó por tomar tres puntos experimentales. Luego, en la columna S₃A, se tomaron once puntos experimentales.

El perfil de bacterias heterótrofas se puede apreciar en las Figuras A5.1, A5.2 y A5.3

En la Figura A5.1 se puede observar dentro de los primeros 20 centímetros existe una mayor concentración de microorganismos. Esta zona se le denominó *zona microbiana activa*, donde existiría una mayor descomposición de la materia orgánica existente en el suelo. En las otras figuras, el efecto no es tan claro, pero si las comparamos con los perfiles de DBO₅ y DQO, tenemos que en la mayoría existe un comportamiento similar, que hace afirmar la existencia de microorganismos especializados en los primeros centímetros de suelo.

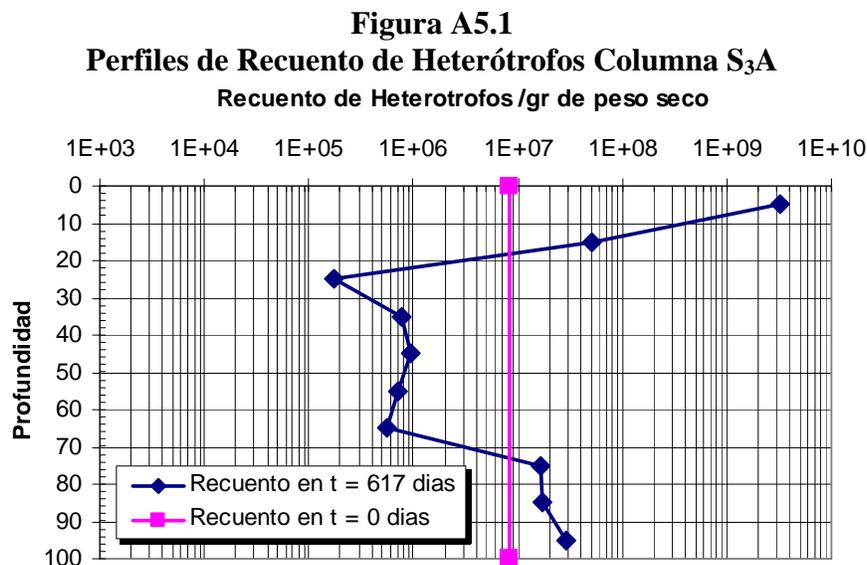


Figura A5.2
Perfiles de Recuento de Heterótrofos Columna S₅A

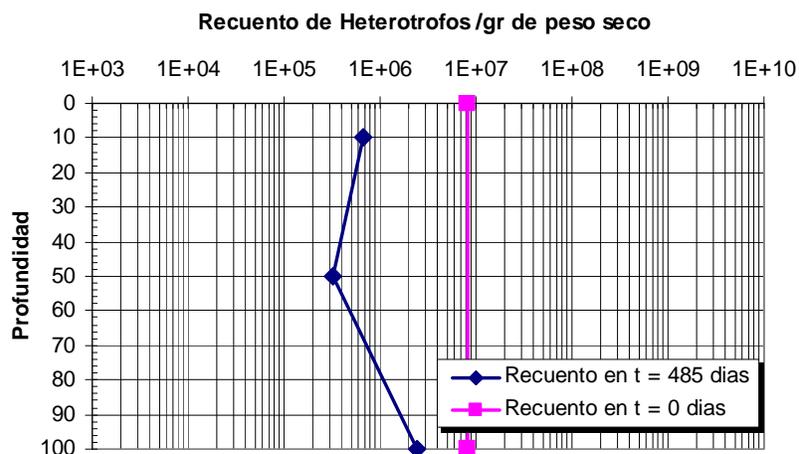
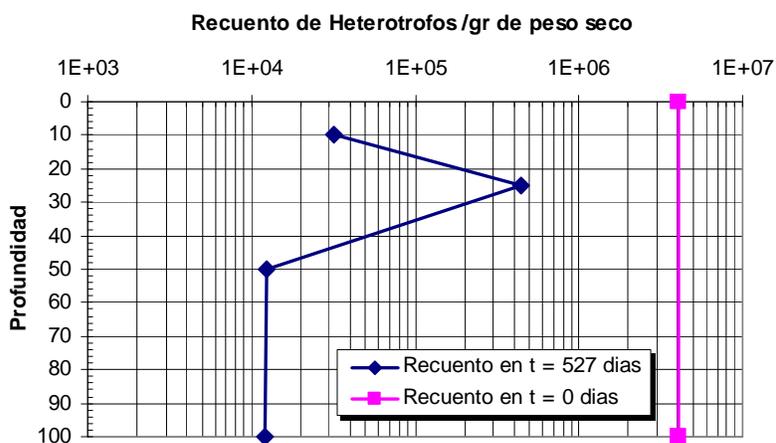


Figura A5.3
Perfiles de Recuento de Heterótrofos Columna S₈A



En la Tabla A5.1, se presentan los resultados de toxicidad de la fracción soluble existentes en diferentes columnas de suelo cortadas.

Tabla A5.1
Valores de Toxicidad En Diferentes Columnas

Columna	Prof [cm]	<i>Daphnia</i> TA	UT	<i>Hydra</i> TA	UT	<i>Hydra</i> SL	UT	<i>Lactuca</i>	UT
		CI50-48h (%)	%	CL50-96h (%)	%	CI50-96h (%)	%	CI-5d (%)	%
		Peso Seco		Peso Seco		Peso Seco		Peso Seco	
S ₅ A	10	12.24	8.2	1.54	74.9	0.17	588	28.7	3.5
S ₅ A	50	atóxica	< 1	8.28	12.1	3.67	27.2	11.3	8.9
S ₅ A	100	atóxica		20.20	5.0	7.35	13.6	9.3	10.8
S ₈ A	10	atóxica		Atóxica		1.50	76.7	atóxica	< 1
S ₈ A	25	6.84	14.6	7.10	14.1	1.13	88.5	atóxica	< 1
S ₈ A	50	atóxica		8.00	12.5	1.73	57.8	atóxica	< 1
S ₈ A	100	atóxica		6.50	15.4	1.30	77.9	atóxica	< 1
S ₃ A	6	2.52	39.7	0.23	434.8	0.08	1250.0	6.98	14.3
S ₃ A	15	< 4.27	> 23.4	1.80	72.5	1.0	100.0	atóxica	< 1
S ₃ A	25	< 4.53	> 22.1	2.60	38.5	1.6	62.5	atóxica	< 1
S ₃ A	35	< 4.51	> 22.2	2.3	43.5	1.3	77.9	atóxica	< 1
S ₃ A	45	< 4.52	> 22.1	2.72	37.0	1.6	74.1	atóxica	< 1
S ₃ A	55	< 4.53	> 22.1	3.10	32.3	1.8	57.1	atóxica	< 1
S ₃ A	65	< 4.51	> 22.2	2.77	35.7	1.5	75.8	atóxica	< 1
S ₃ A	75	< 4.52	> 22.1	2.98	33.0	1.7	58.8	atóxica	< 1
S ₃ A	85	< 4.50	> 22.2	2.79	35.7	1.4	73.5	atóxica	< 1
S ₃ A	95	< 4.38	>22.8	3.12	32.1	ND		atóxica	< 1

En forma gráfica en las Figuras A5.3 se presentan los perfiles de toxicidad, en función de UT (unidades tóxicas) de la columna S₃A, para las diferentes técnicas empleadas para la determinación de la toxicidad.

Figura A5.3
Perfiles de Toxicidad Columnas S₃A

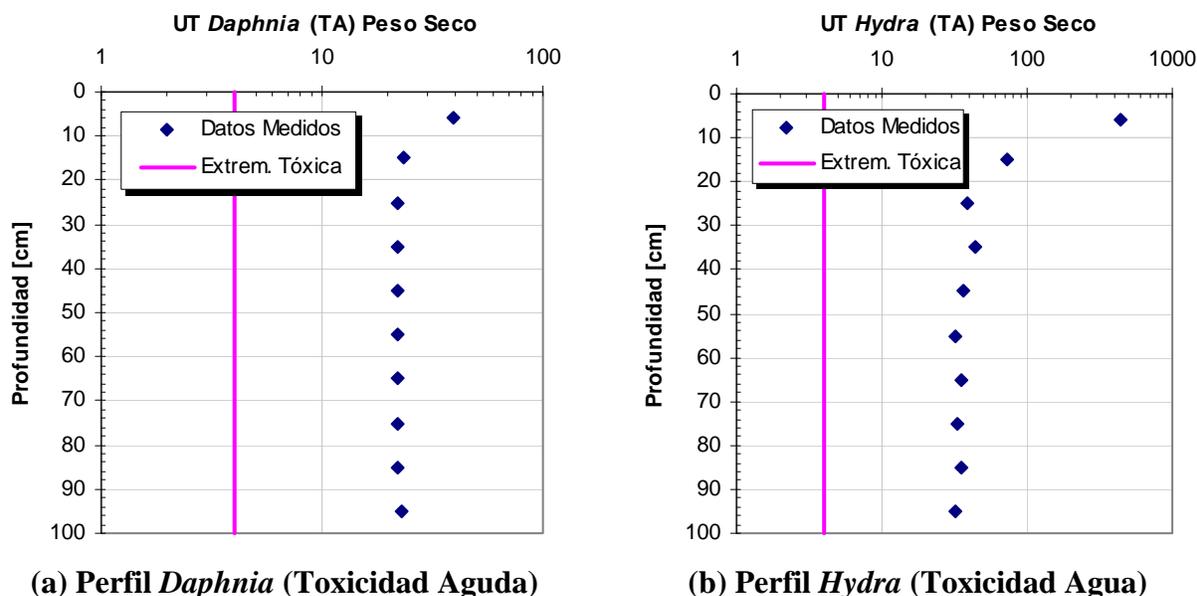
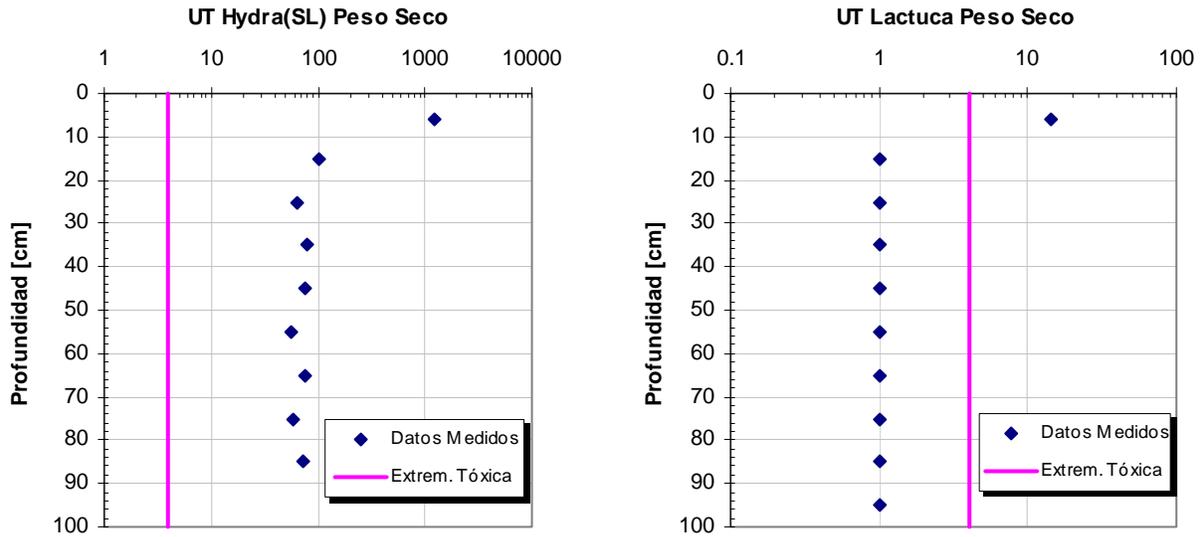


Figura A5.3 (Continuación)
Perfiles de Toxicidad Columnas S₃A



(c) Perfil Hydra (SL)

(d) Perfil Lactuca

En cada una de las figuras se presenta una línea vertical que representa el rango que a partir del cual la muestra es extremadamente tóxica. Se aprecia que la mayoría de los ensayos efectuados revela que las muestras son extremadamente tóxicas, menos para la *Lactuca*, que posee una mayor resistencia a la toxicidad. En términos generales, se puede hablar de muestras extremadamente tóxicas.

Al analizar los datos presentados en las Figuras A5.3, podemos decir que en términos relativos existe un pequeño grado de detoxificación en el suelo a medida que avanzamos en la columna, que queda reflejado en la disminución de las UT (unidades tóxicas) y en mayor medida en los primeros metros de suelo.

Si se plantea el escenario que la fuente de contaminación se elimina o las tasas de infiltración son muy pequeñas, y se produce un lavado de la fracción soluble, ya sea por algún evento de precipitación o escorrentía sobre el sitio contaminado, lo que el suelo infiltraría frente a un evento extremo, sería un líquido extremadamente tóxico.

ANEXO 6
DESCRIPCIÓN DE MODELO HYDRUS 1D

ANEXO 6: DESCRIPCIÓN MODELO HYDRUS 1D

Introducción Programa HYDRUS 1D

El programa comercial HYDRUS 1D fue desarrollado por los investigadores: J. Šimůnek, M. Šejna and M. Th. Van Genuchten el año 1998, para simular el movimiento del agua, calor y múltiples solutos en medios saturados variables, en Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riversides, California.

HYDRUS 1D resuelve las ecuaciones de Richards para flujos de agua de saturación variable y ecuaciones del tipo convección dispersión para flujos de calor y transporte de solutos. Las ecuaciones de flujo incorporan un término fuente (S) para calcular el agua tomada por las raíces de las plantas. La ecuación general utilizada para el modelo 1D, se presenta a continuación:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (\text{A6.1})$$

donde:

- h : Nivel piezométrico del agua [L]
- θ : Contenido de agua volumétrico [L^3L^{-3}]
- t : Tiempo [T]
- x : Coordenada espacial [L]
- S : Término fuente [$L^3L^{-3}T^{-1}$]
- α : Ángulo entre la dirección del flujo y el eje vertical ($\alpha = 0^\circ$ para flujo vertical, $\alpha = 90^\circ$ para flujo horizontal, $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ para flujo inclinado)
- K : Conductividad hidráulica no saturada [LT^{-1}] que viene dada por la siguiente expresión:

$$K(h,x) = K_s(x) \cdot K_r(h,x) \quad (\text{A6.2})$$

donde:

- K_r : Conductividad hidráulica relativa, número entre 0 y 1 [-]
- K_s : Conductividad hidráulica saturada [L^3L^{-3}]

Las ecuaciones de transporte de solutos consideran transporte por convección y dispersión en la fase líquida, así como difusión en la fase gaseosa. También, las ecuaciones de transporte incluyen un módulo para: reacciones de no equilibrio no lineales entre la fase líquida y sólida, reacciones en equilibrio lineales entre la fase líquida y gaseosa, producciones de orden cero y dos reacciones de degradación de primer orden: una de las cuales es independiente de otros solutos y una que proveen un acoplamiento entre solutos envueltos en reacciones de decaimiento de primer orden. Además, la física de los problemas de transporte de solutos en desequilibrio se consideró asumiendo dos regiones, con una formulación del tipo porosidad dual, la cual particiona la fase líquida en región móvil e inmóvil.

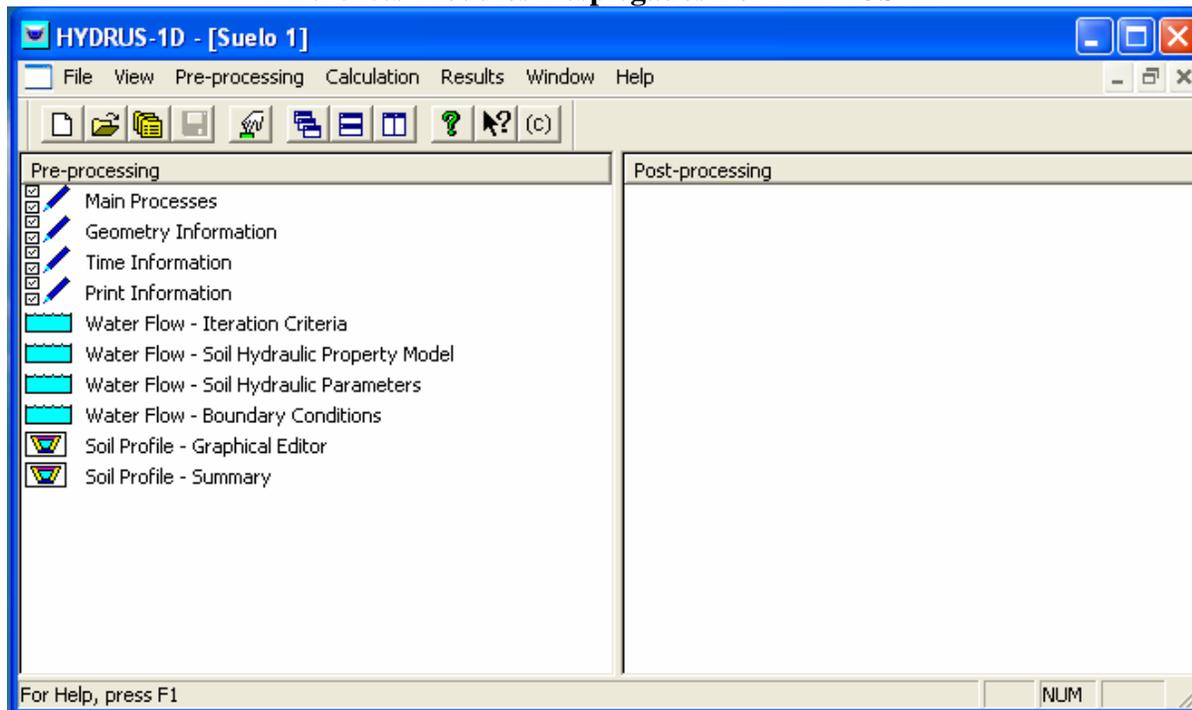
El programa puede ser usado para analizar movimiento de agua y solutos en medios porosos no saturados, parcialmente saturados o completamente saturados. La región de flujo puede ser compuesta por suelos no uniformes. El flujo y transporte puede ocurrir en la vertical, horizontal o generalmente en direcciones inclinadas.

Las ecuaciones que gobiernan las ecuaciones de flujo y transporte son solucionadas numéricamente utilizando un esquema de elementos finitos lineales del tipo Galerkin.

Programa HYDRUS 1D

El programa HYDRUS 1D permite una interacción con el usuario muy amigable, mediante un sistema tipo Windows, en donde el usuario puede ingresar gran parte de la información a través de diferentes módulos. Al considerar solamente el problema de flujo, los menús que se despliegan son los siguientes: principales procesos, información geométrica, información de tiempo, información de impresión, criterio de iteración (Problema de flujo), Modelo de propiedades hidráulico del suelo modelado (Problema de flujo), parámetros hidráulicos del suelo (Problema de flujo), Condiciones de borde (Problema de flujo), editor gráfico del problema y por último un sumario con los datos entrados al modelo. Los que se pueden apreciar en la Figura A6.1

Figura A6.1
Diferentes Módulos Desplegados Por HIDRUS 1D

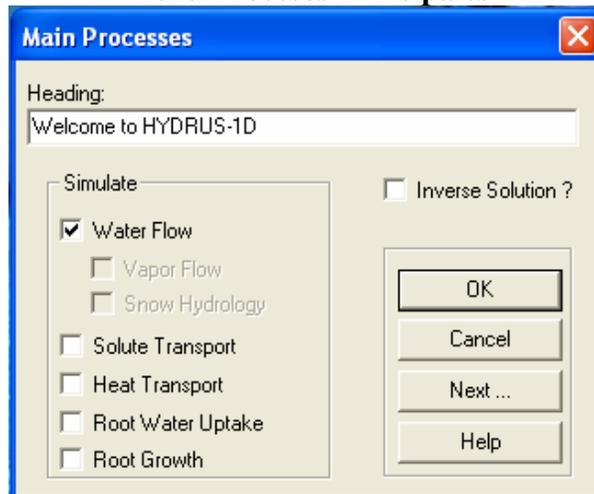


Al momento de construir un modelo de flujo, hay que completar cada una de las características que pide cada menú nombrado más arriba.

Los cuatro primeros menús corresponden a la información básica necesaria para la construcción de un modelo de flujo en la zona no saturada. Los menús son los siguientes:

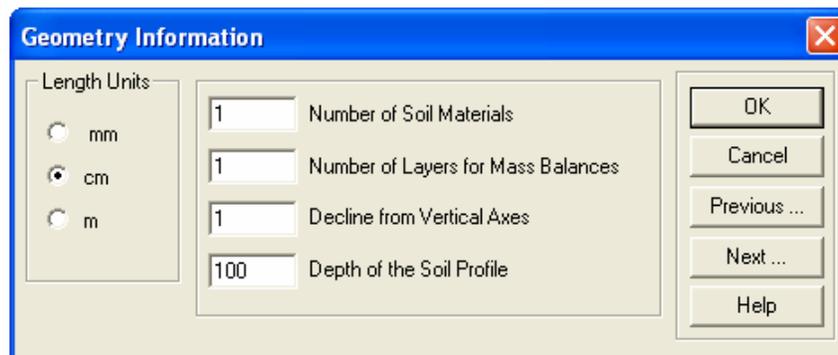
- **Procesos Principales:** En este menú se da la posibilidad de elegir entre los principales procesos que es capaz de desarrollar HYDRUS 1D: flujo de agua, transporte de solutos, transporte de calor, toma de agua de las raíces de las plantas y crecimiento de las raíces. En la Figura A6.2 se puede apreciar las opciones posibles.

Figura A6.2
Menú Procesos Principales



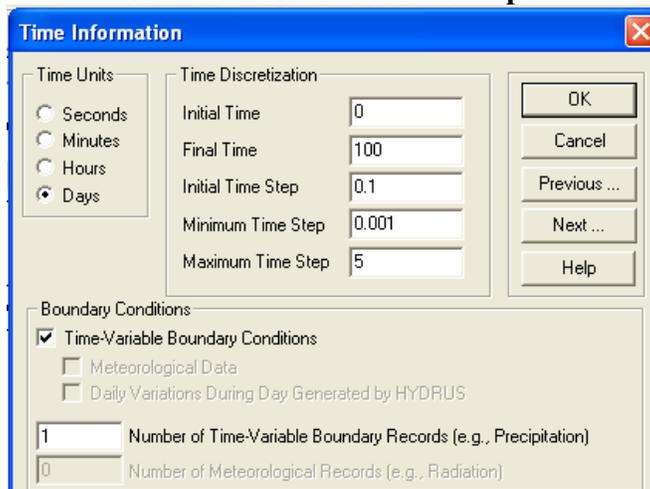
- **Información Geométrica:** en este punto se entregan al programa las unidades de medidas a utilizar en el modelo, así como número de materiales de suelo, número de capas de balance de masas a utilizar, ángulo o declinación con respecto al eje vertical y el largo del corte de suelo modelado.

Figura A6.3
Menú Información Geométrica



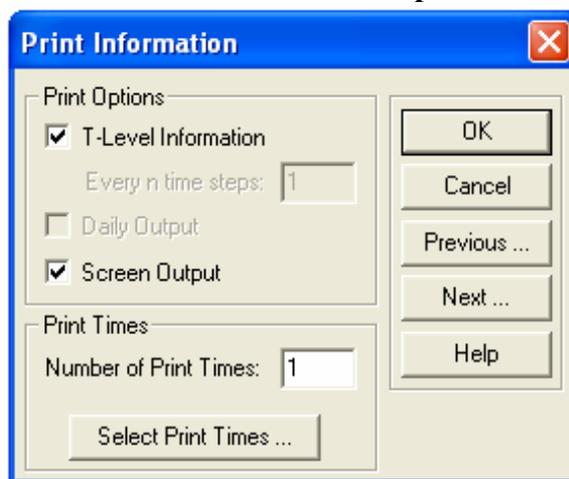
- **Información de Tiempo:** al igual que el menú anterior se deben entregar las unidades de tiempo en que se va a trabajar, tiempo de inicio y tiempo final de la simulación, paso de inicio de la simulación, paso mínimo de tiempo y paso máximo de tiempo. Además, se debe elegir entre condiciones de borde constantes o variables a lo largo de todo el tiempo de simulación. En el caso de elegirse condiciones de borde variables, se debe ingresar el número de condiciones en el tiempo de que se posee.

Figura A6.4
Menú Información de Tiempo



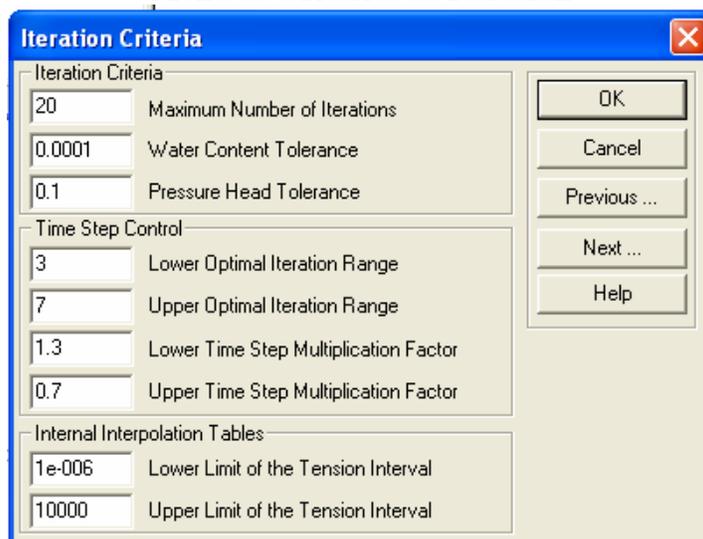
- **Información de impresión:** En este punto se eligen los tiempos de interés donde se desea ver los resultados entregados por el modelo de simulación. (Ver Figura A6.5). Además, se pueden elegir los tiempos de presentación de resultados o dejarlos equiespaciados de acuerdo al tiempo total simulado.

Figura A6.5
Menú Información de Impresión



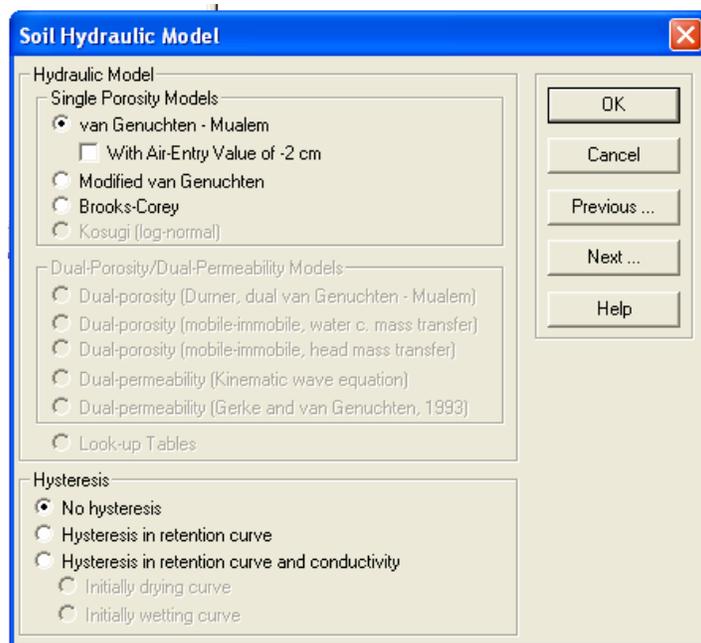
- **Criterios de Iteración:** En este punto se deben elegir los criterios de iteración del modelo numérico en cuanto a: criterios de iteración (máximo numérico de iteraciones, tolerancia del nivel de agua, tolerancia de presión estática), control del paso del tiempo (factores multiplicadores, rango mínimo y óptimo de iteraciones) y tablas de interpolación interna (valores máximos y mínimos de interpolación de la tensión en el suelo). La mayoría de las veces se deben elegir las opciones por defecto que trae el programa.

Figura A6.6
Menú de Criterios de Iteración



- **Modelo Hidráulico de Suelo:** HYDRUS 1D permite elegir entre tres modelos hidráulicos de curva de succión de los suelos estudiados. Estos modelos son: Van Genuchten –Mualem (1980), Van Genuchten modificado (1988) y Brooks – Corey (1964). Además, posee un modelo que permite incorporar el fenómeno de histéresis en el comportamiento del suelo. En la Figura A6.7 se presenta el menú. Estos modelos describen parámetros de retención de agua en el agua, así como la función de conductividad hidráulica, referidas a relaciones constitutivas.

Figura A6.7
Menú Modelo Hidráulico de Suelo



- **Parámetros Hidráulicos de Flujo de Agua por el Suelo:** El modelo requiere que una variedad de parámetros, dependiendo del modelo elegido. Si las histéresis es modelada se requerirán una variedad mayor de parámetros. Además, HYDRUS 1D posee una base de datos que permite calcular los diferentes parámetros de los modelos, en función de variables como: tipo de suelo, contenido de arena, contenido de limo, contenido de arcilla, densidad del suelo y contenidos de humedad a 33 kPa y 1500 kPa. (Ver Figura A6.8)

Figura A6.8
Menú Parámetros De Flujo del Agua

Mat	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	l
1	0.078	0.43	0.036	1.56	24.96	0.5

Soil Catalog: Loam Neural Network Prediction Temperature Dependence

Buttons: OK, Cancel, Previous ..., Next ..., Help

- **Condiciones de Borde de Flujo:** Existen una serie de condiciones de borde superiores e inferiores que se deben elegir. Dentro de las principales condiciones tenemos: presión constante, flujo constante, condición atmosférica superior, presión variable, drenaje libre, drenaje profundo, etc. Además, se debe elegir las “condiciones iniciales” con que se debe comenzar en la columna, puede ser en succión inicial o contenido de humedad.

Figura A6.9
Menú De Condiciones de Borde De Flujo de Agua

Upper Boundary Condition

- Constant Pressure Head
- Constant Flux
- Atmospheric BC with Surface Layer
- Atmospheric BC with Surface Run Off
- Variable Pressure Head
- Variable Pressure Head/Flux

Lower Boundary Condition

- Constant Pressure Head
- Constant Flux
- Variable Pressure Head
- Variable Flux
- Free Drainage
- Deep Drainage
- Seepage Face
- Horizontal Drains

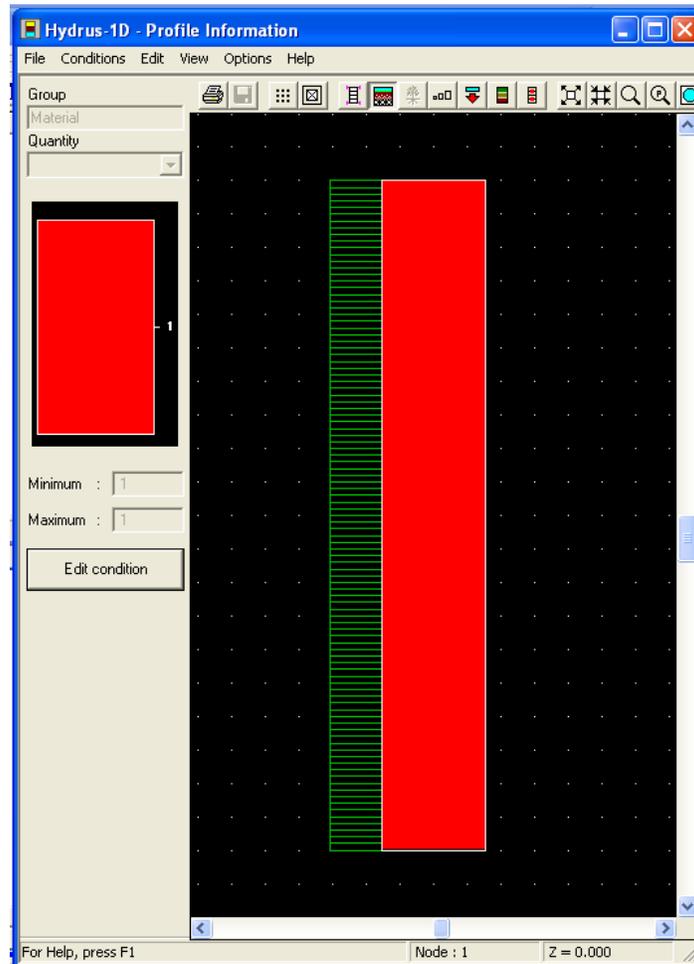
Initial Condition

- In the Pressure Head
- In the Water Content

Buttons: OK, Cancel, Previous, Next, Help

- **Edición Gráfica:** En este menú se puede elegir o completar las siguientes opciones del modelo: discretización espacial, distribución de los materiales, factores de escala para permeabilidad, presión o humedad, valor y ubicación de condiciones iniciales de presión o humedad, ubicación de subregiones para el balance, ubicación de puntos de observación. (VER Figura A6.10)

Figura A6.10
Menú De Edición Gráfica



Dentro de las principales ventajas que presenta el modelo HYDRUS 1D es la facilidad de manejo de la información de pre y post proceso. El post proceso se puede obtener en forma gráfica o en forma de archivos con los cálculos realizados para cada uno de los pasos de tiempo requeridos o los usados por el modelo.

ANEXO 7
CALIBRACIÓN MODELO DE FLUJO

ANEXO 7: CALIBRACIÓN DEL MODELO DE FLUJO

A7.1 Columna S₁A y S₁B

La columna S₁B fue la que se rompió y sirvió para la calibración de los parámetros de flujo (curva de succión y permeabilidades). De la Figura A7.1, se puede observar los datos de los volúmenes entrantes y salientes de las columnas S₁A y S₁B respectivamente. Se puede afirmar que el comportamiento presentado por ambas columnas, es muy parecido, razón por la cual, la calibración de la columna S₁B, permitirá estimar los parámetros de flujo para la columna S₁A. En el caso de la permeabilidad de la columna S₁A, se estimó en forma independiente debido al mal ajuste de los caudales de salida de la columna, si se imponía la permeabilidad de la columna S₁B. Se consideró que la permeabilidad fue el grado de libertad entre las dos columnas, siendo la curva de succión de ambas columnas iguales.

Figura A7.1
Volúmenes Acumulados Entrantes y Salientes Columnas S₁A y S₁B

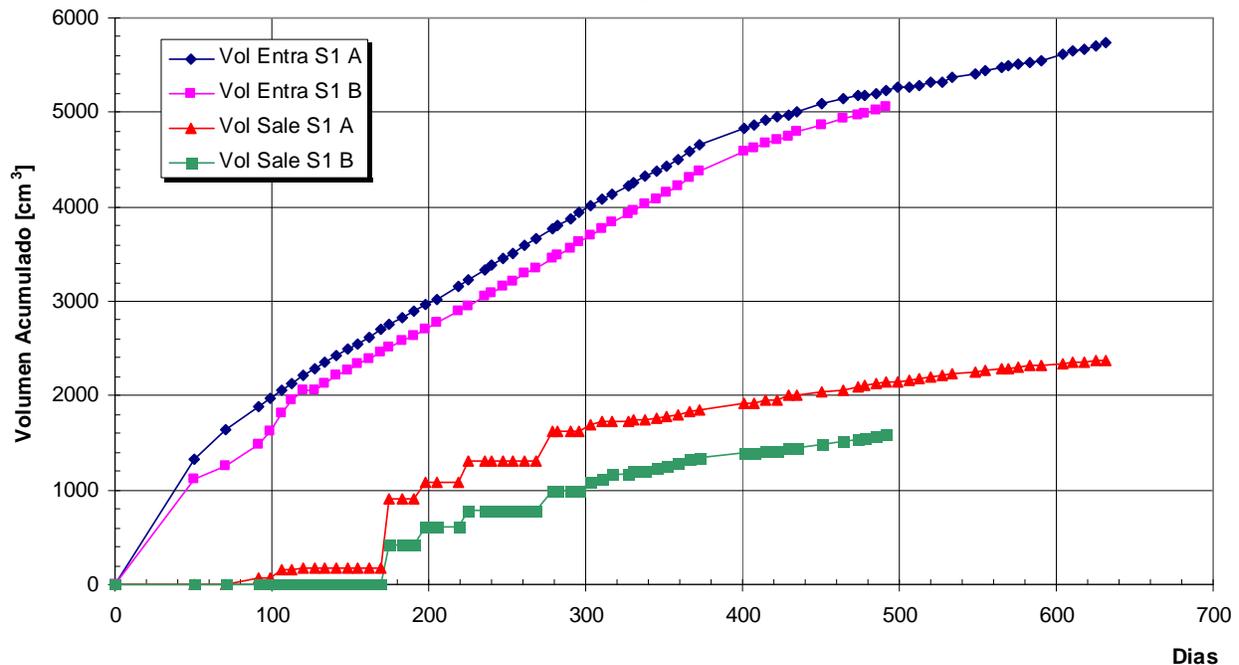


Figura A7.2
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₁A

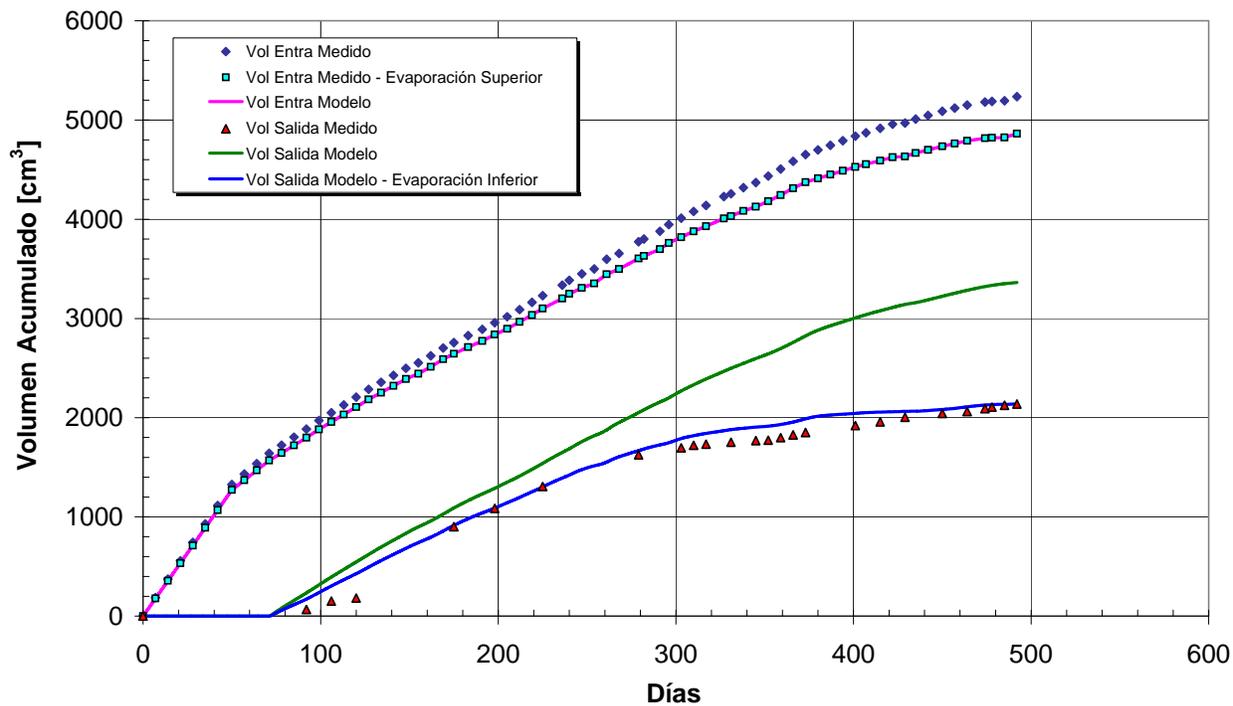


Figura A7.3
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₁B

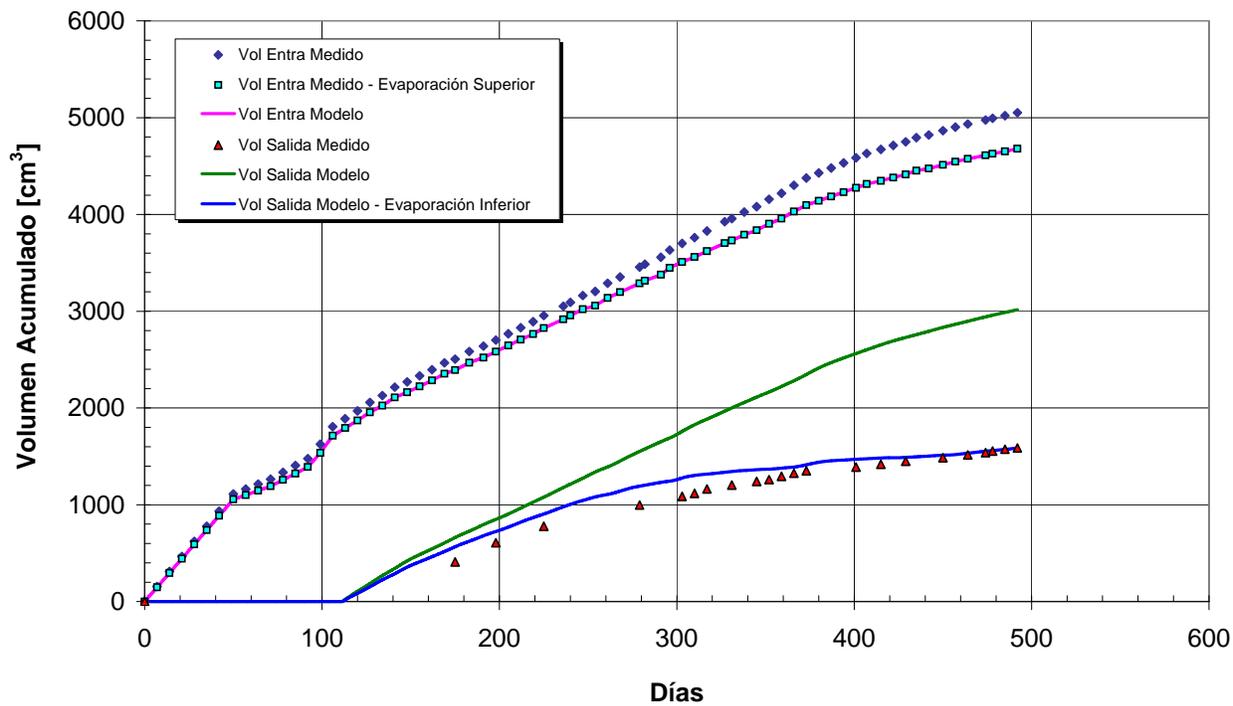


Figura A7.4
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₁A (Perfil de Referencia)

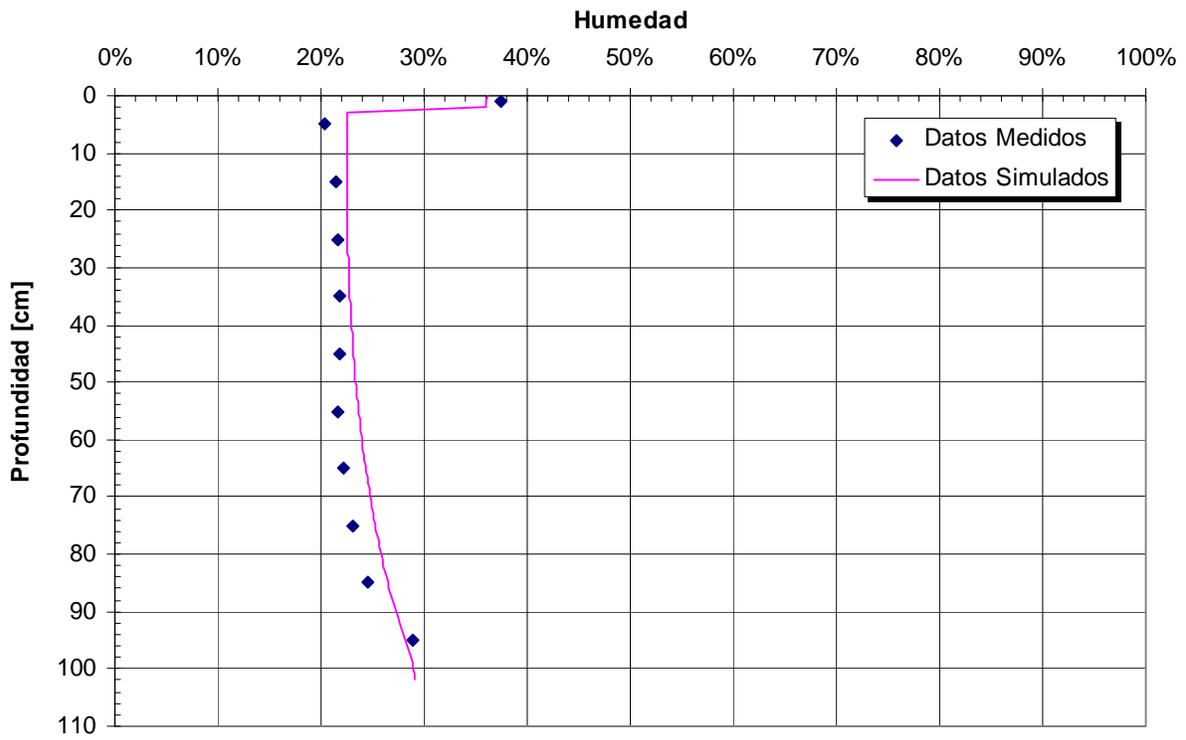
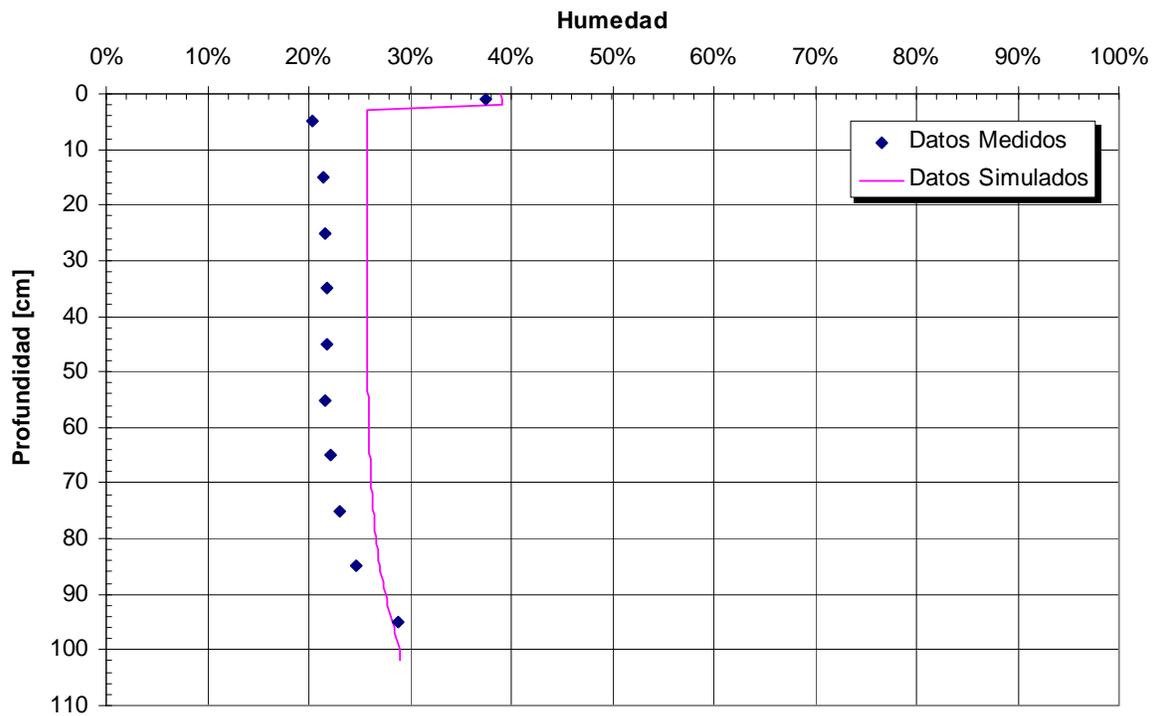


Figura A7.5
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₁B (Perfil Real)



A7.2 Columna S₂A y S₂B

Figura A7.6
Volúmenes Acumulados Columnas S₂A y S₂B

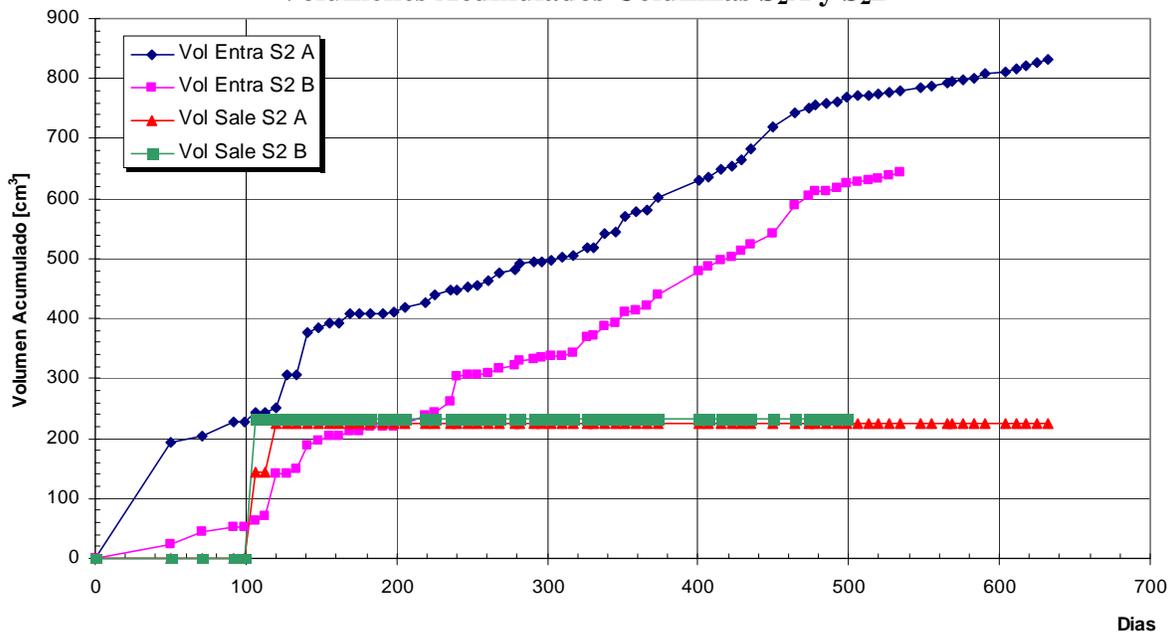


Figura A7.7
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₂A

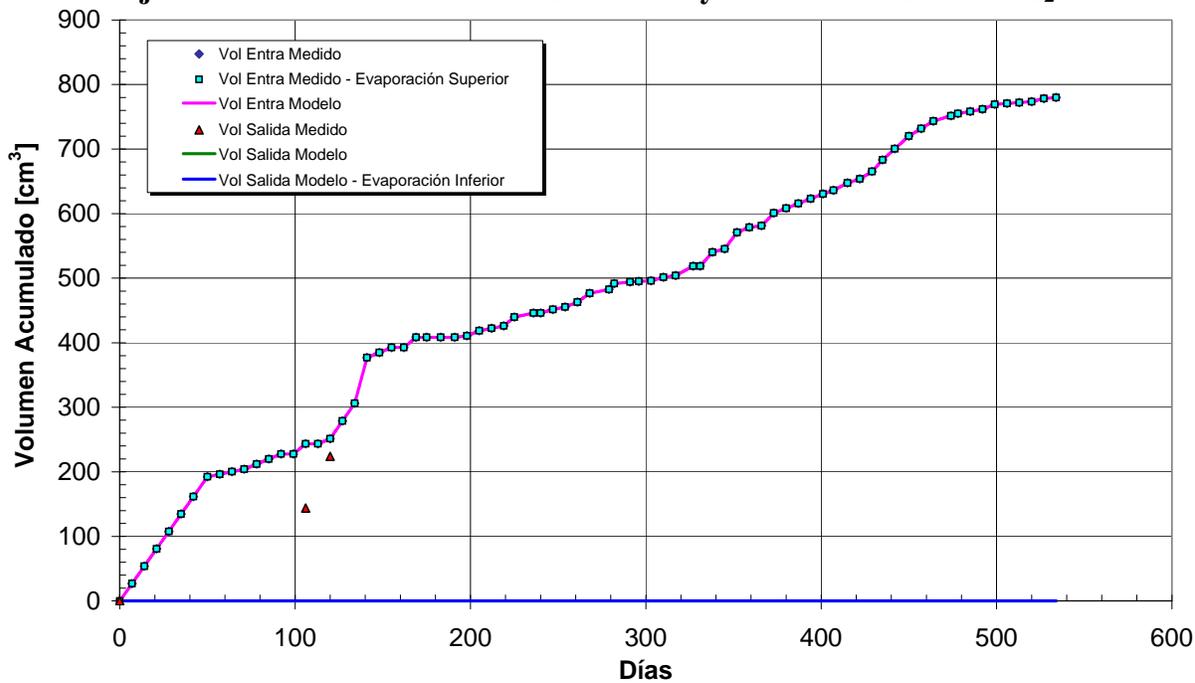


Figura A7.8
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₂B

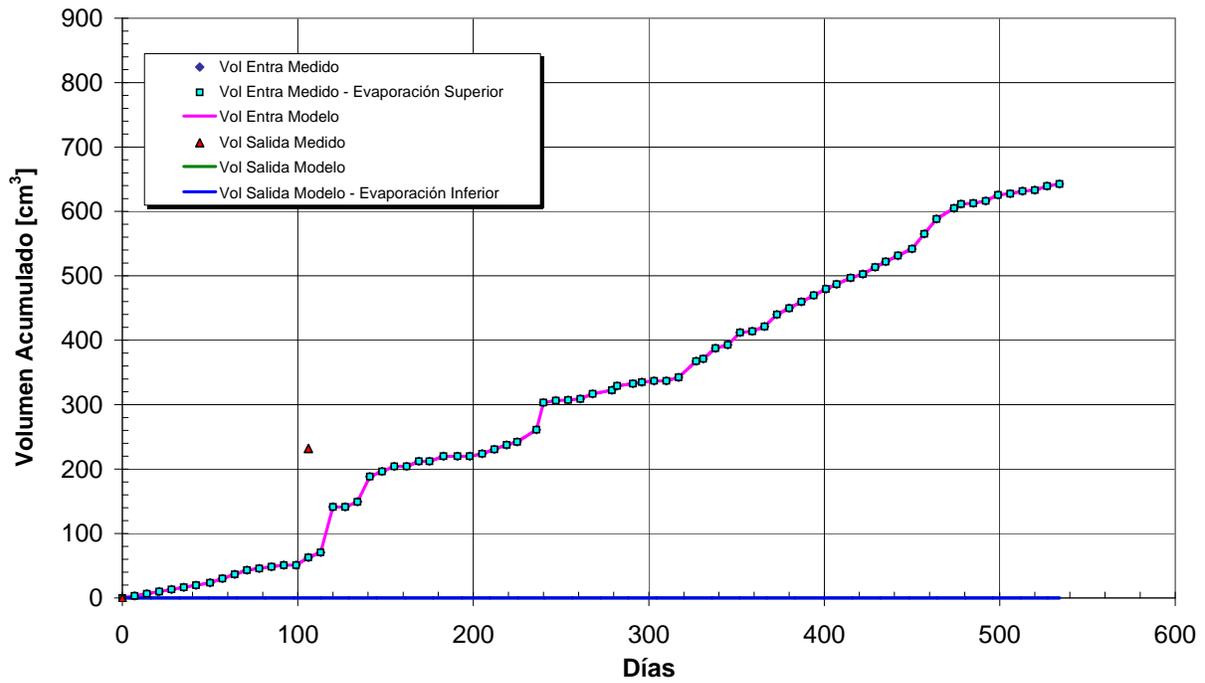


Figura A7.9
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₂A (Perfil de Referencia)

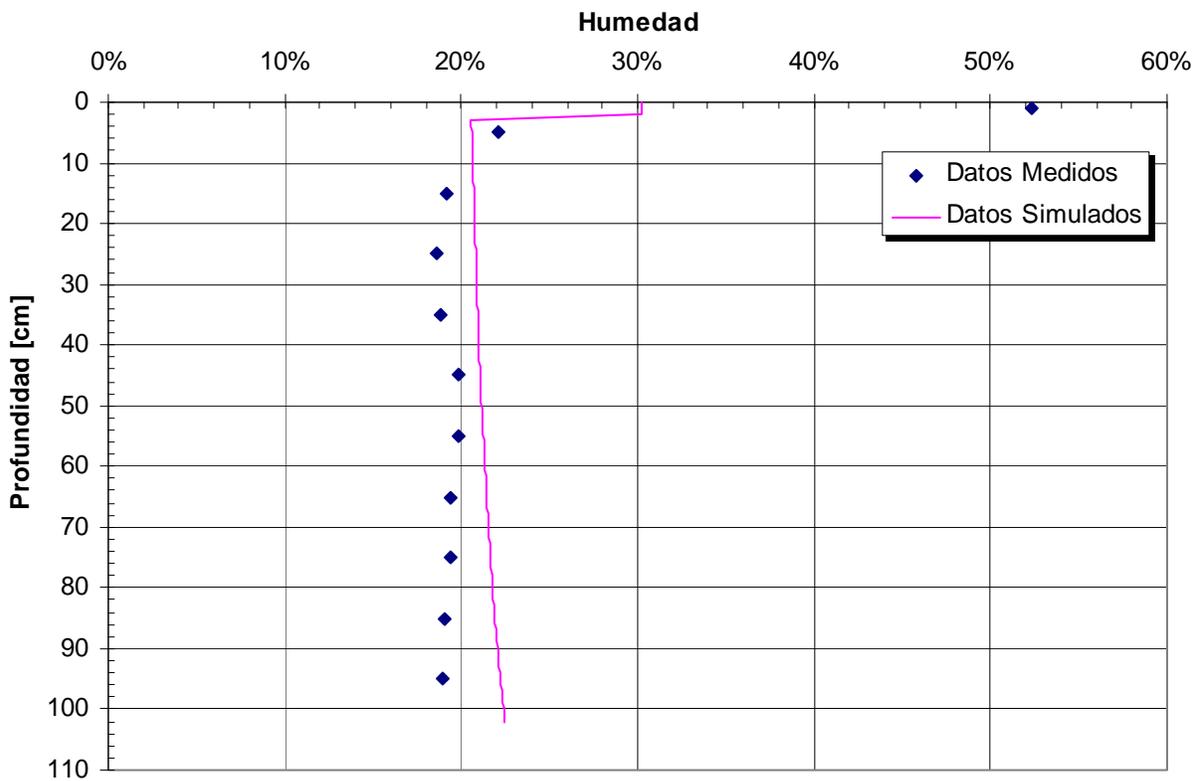
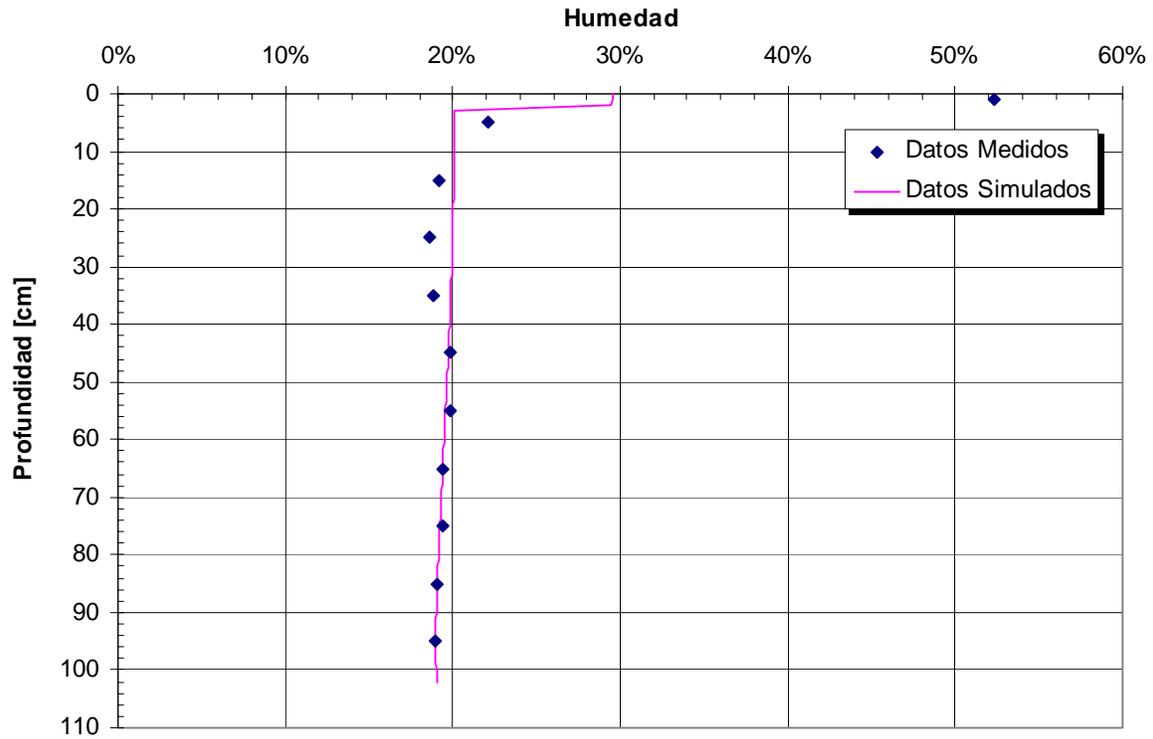


Figura A7.10
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₂B (Perfil Real)



A7.3 Columna S₄A y S₄B

Figura A7.11
Volúmenes Acumulados Columnas S₄A y S₄B

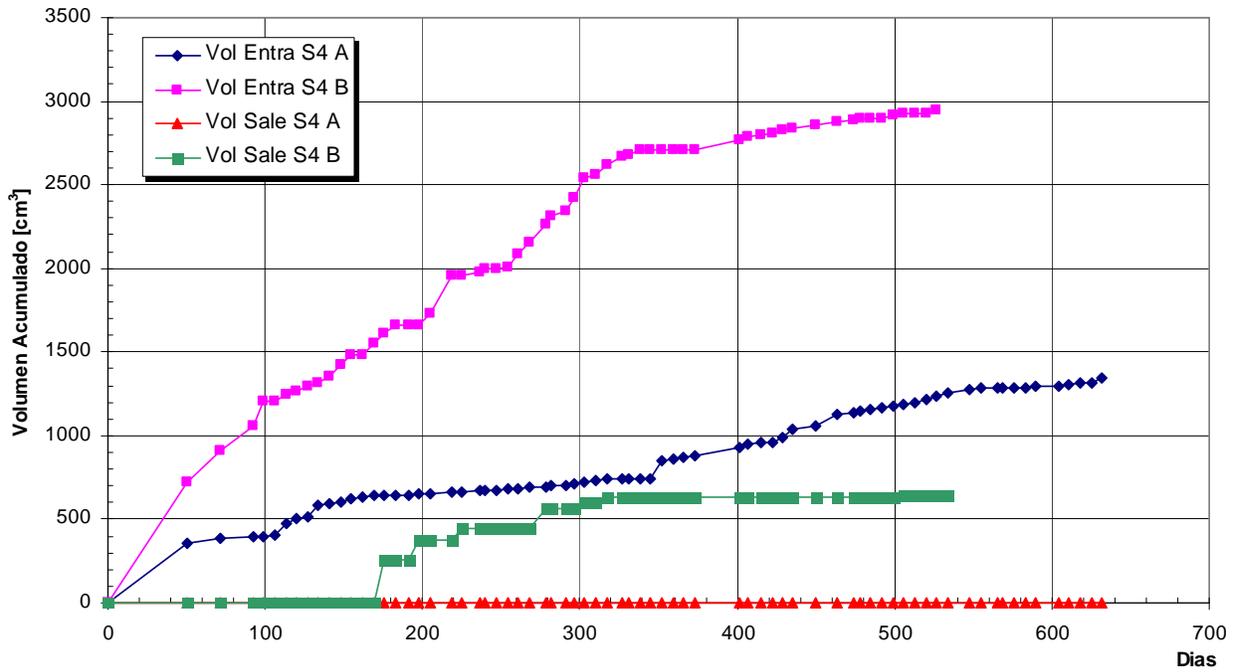


Figura A7.12
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₄B

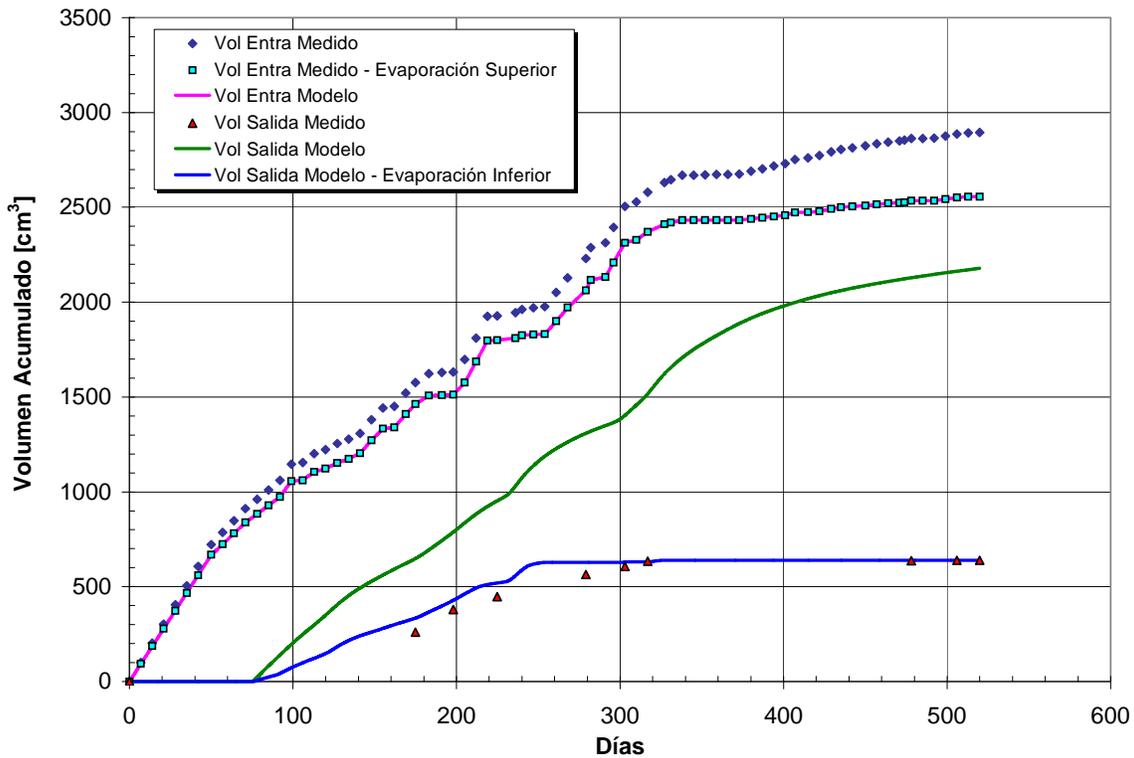
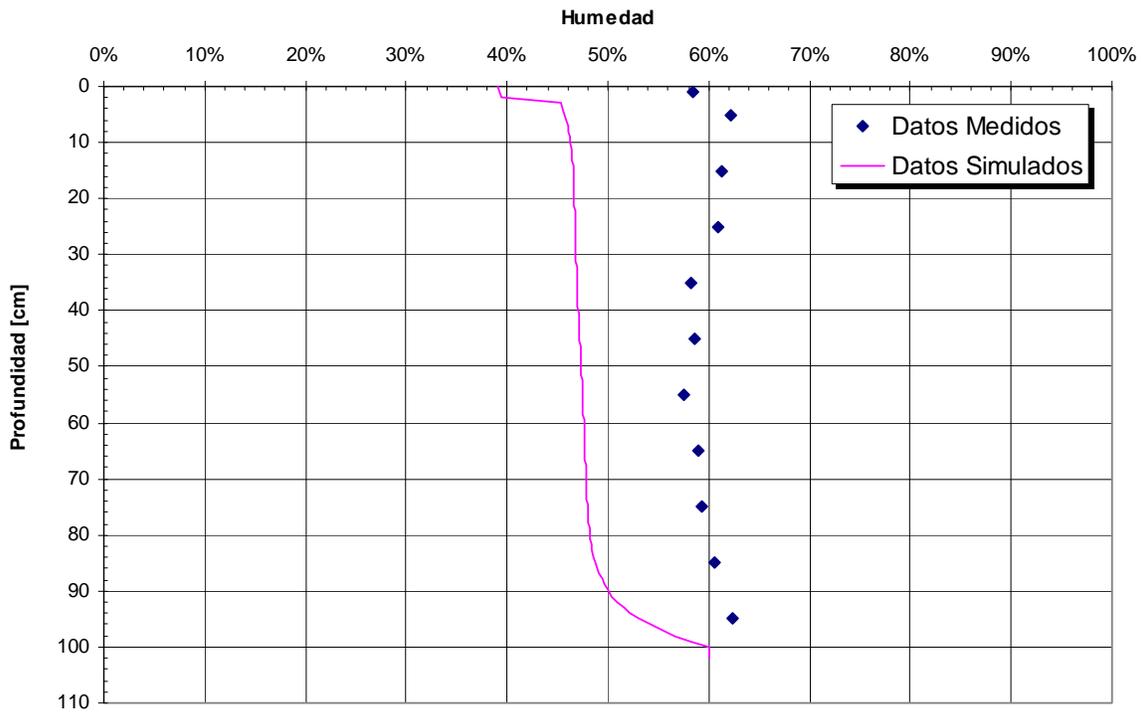


Figura A7.13
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₄B (Perfil Real)



A7.4 Columna S₅A y S₅B

Figura A7.14
Volúmenes Acumulados Columnas S₅A y S₅B

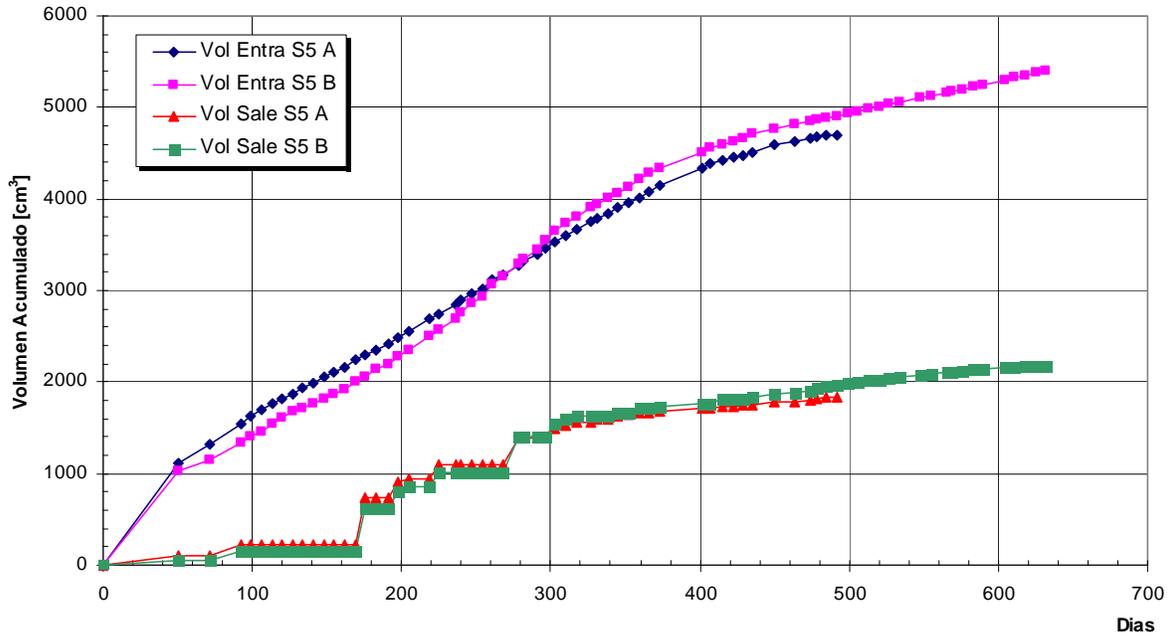


Figura A7.15
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₅A

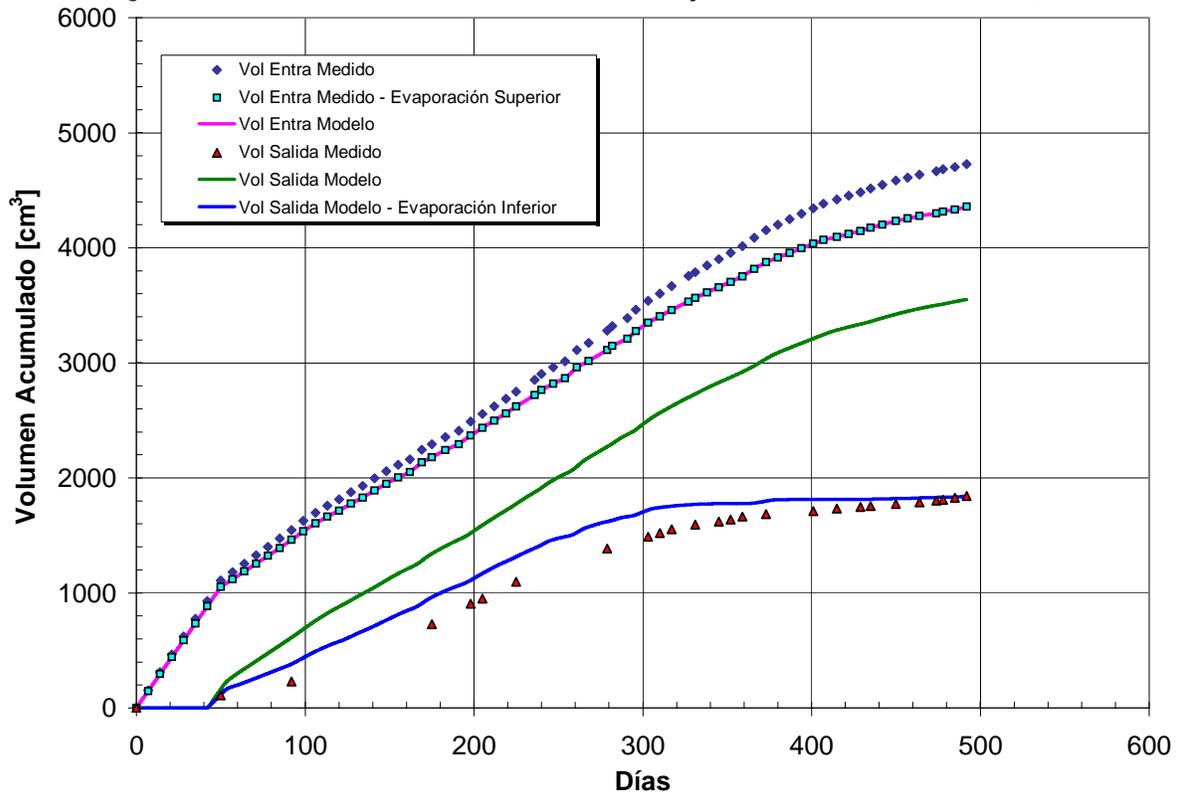


Figura A7.16

Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₅A

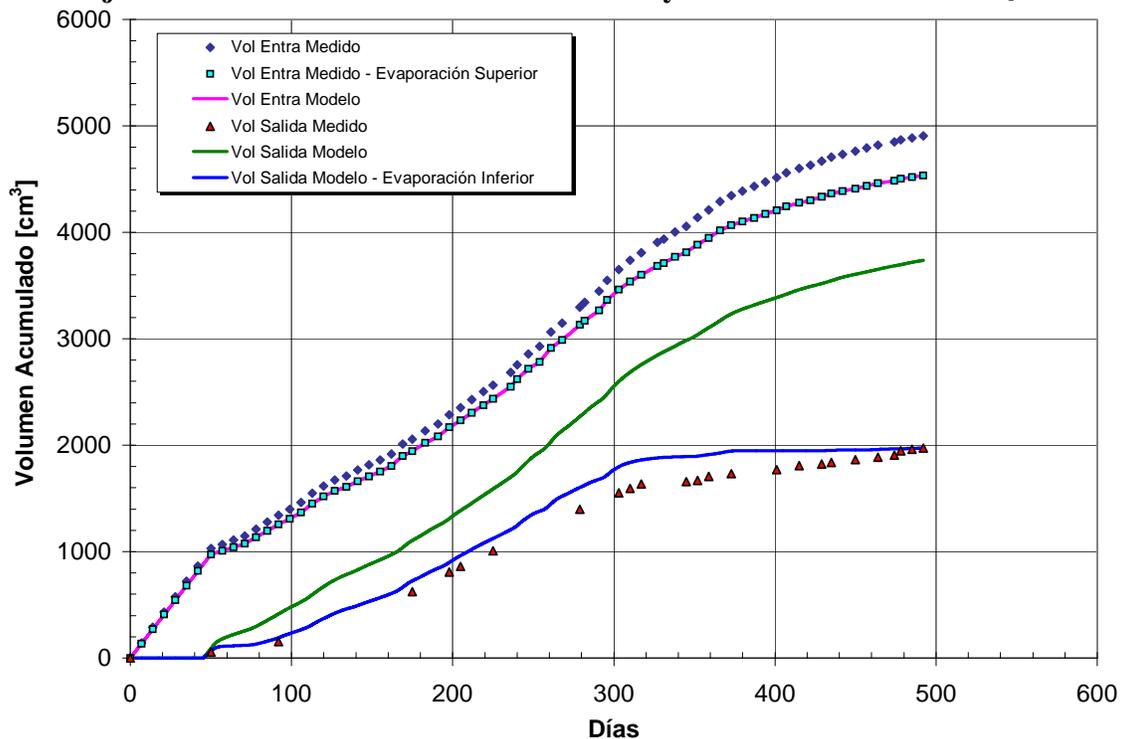


Figura A7.17

Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₅B (Perfil Real)

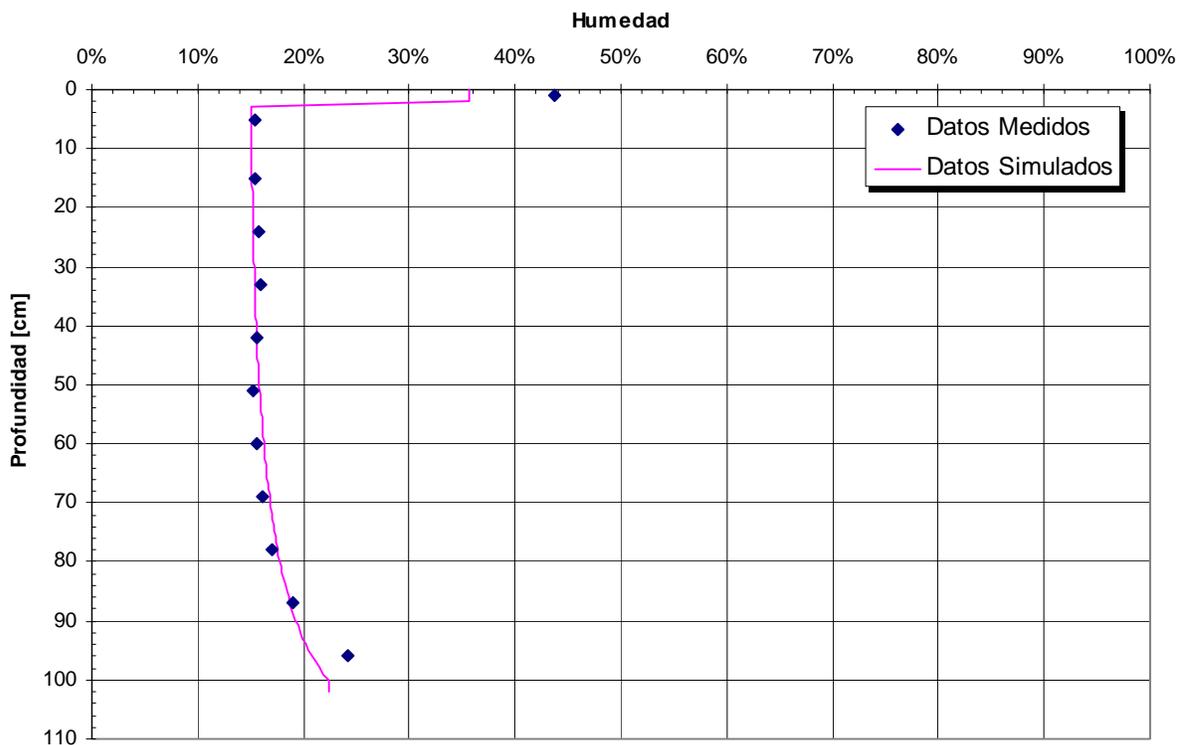
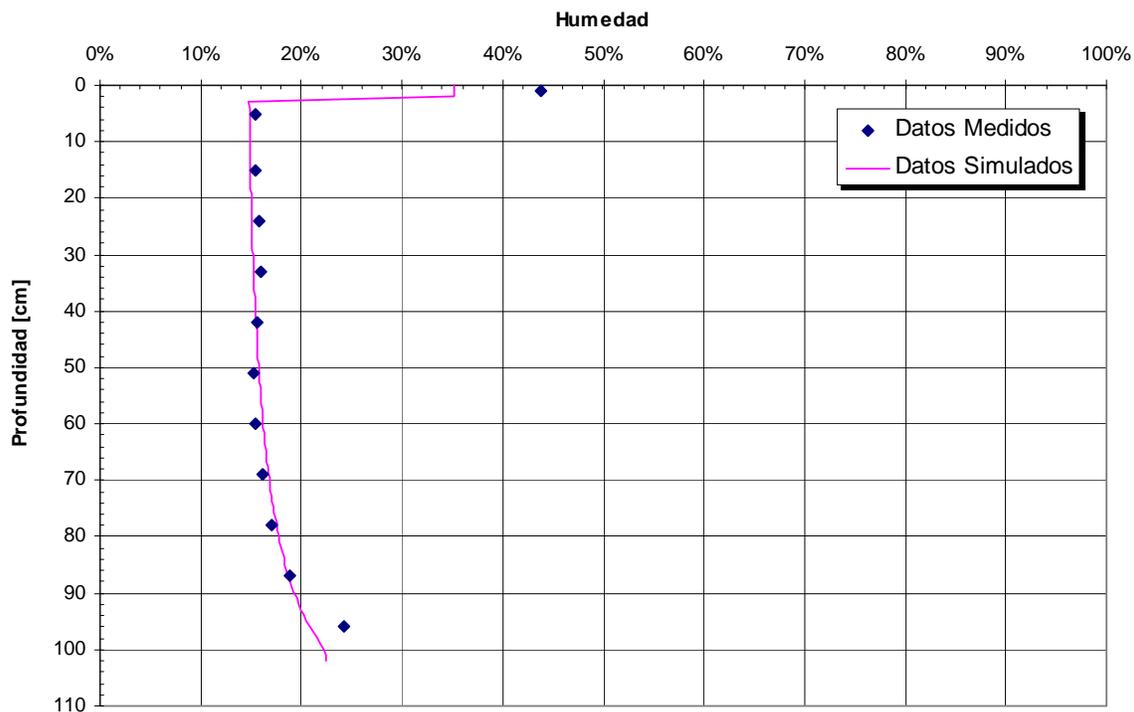


Figura A7.18
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₅B (Perfil de Referencia)



A7.5 Columna S₆A y S₆B

Figura A7.19
Volúmenes Acumulados Columnas S₆A y S₆B

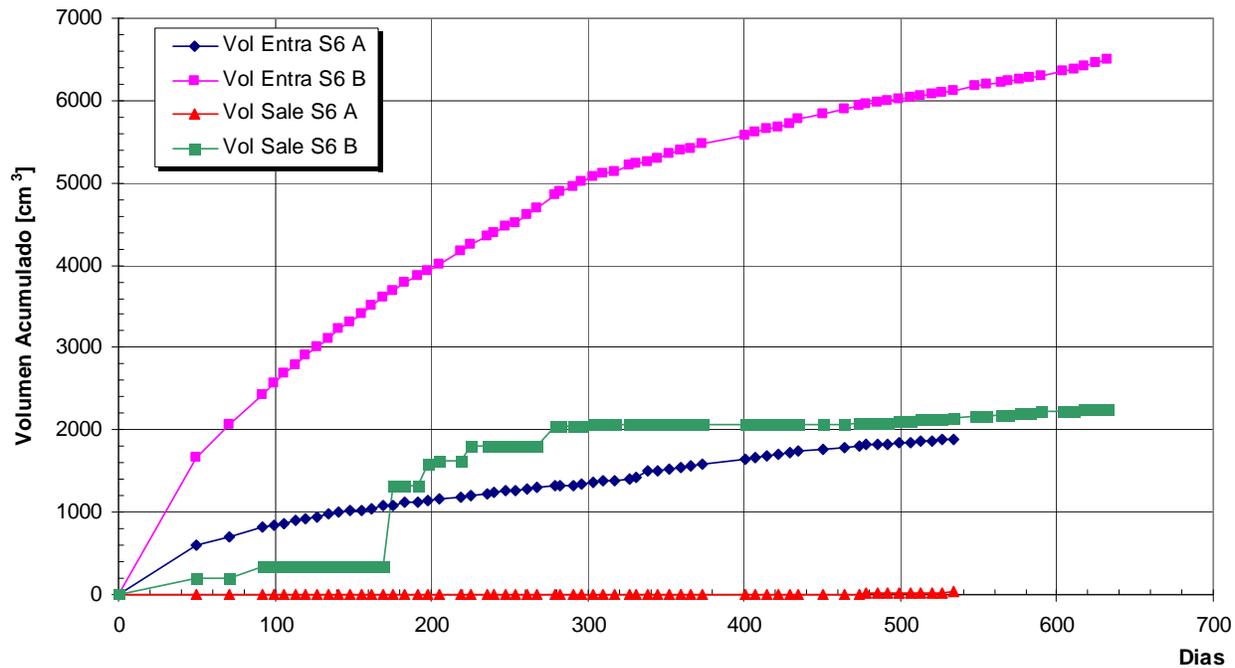


Figura A7.20

Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₆A (V₁)

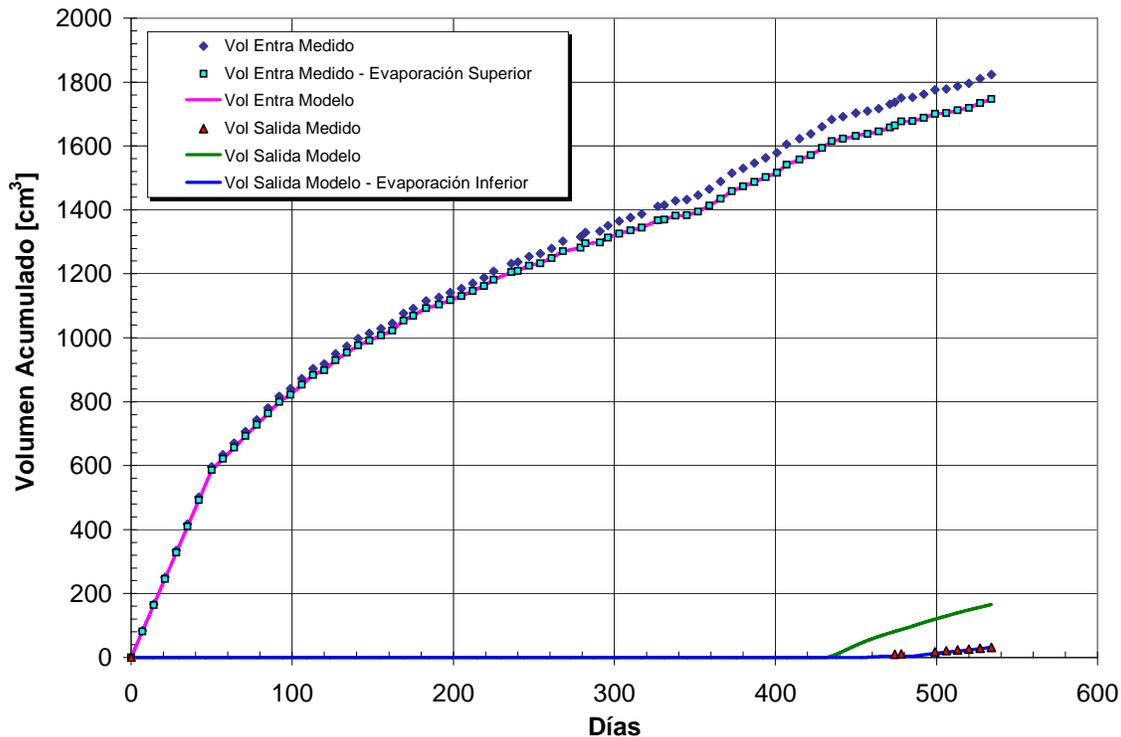


Figura A7.21

Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₆B

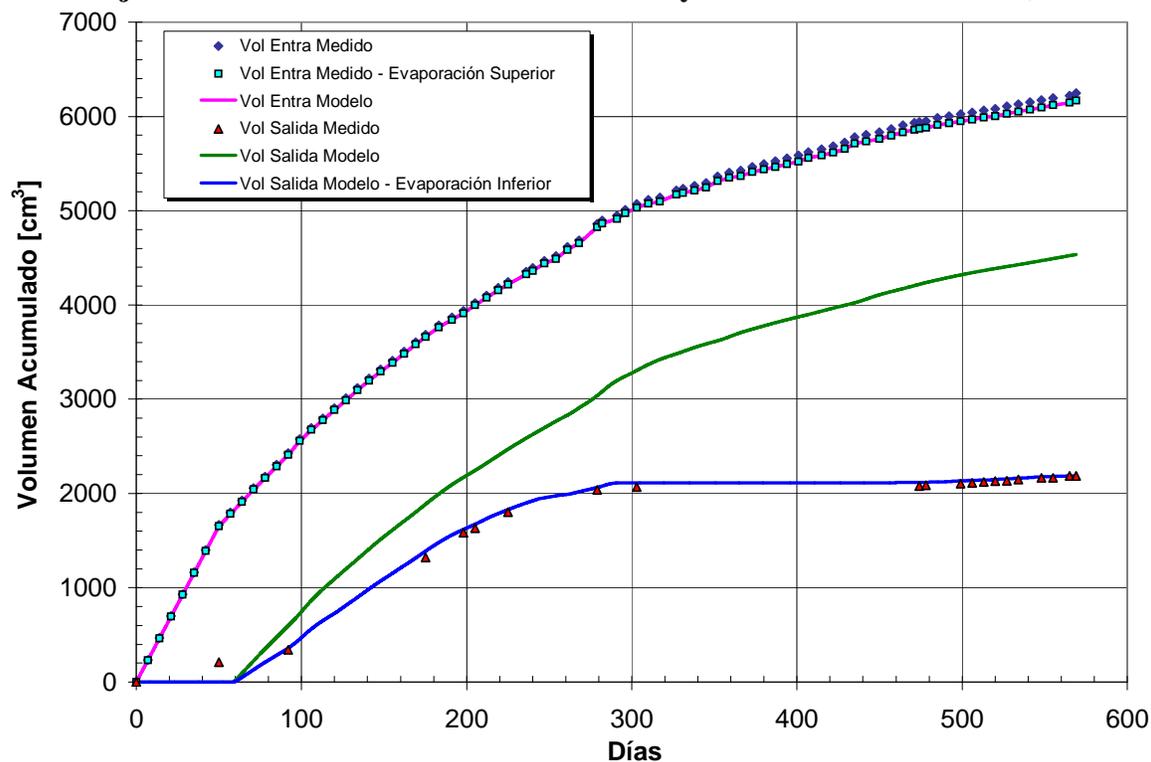


Figura A7.22
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₆A (Perfil de Referencia)

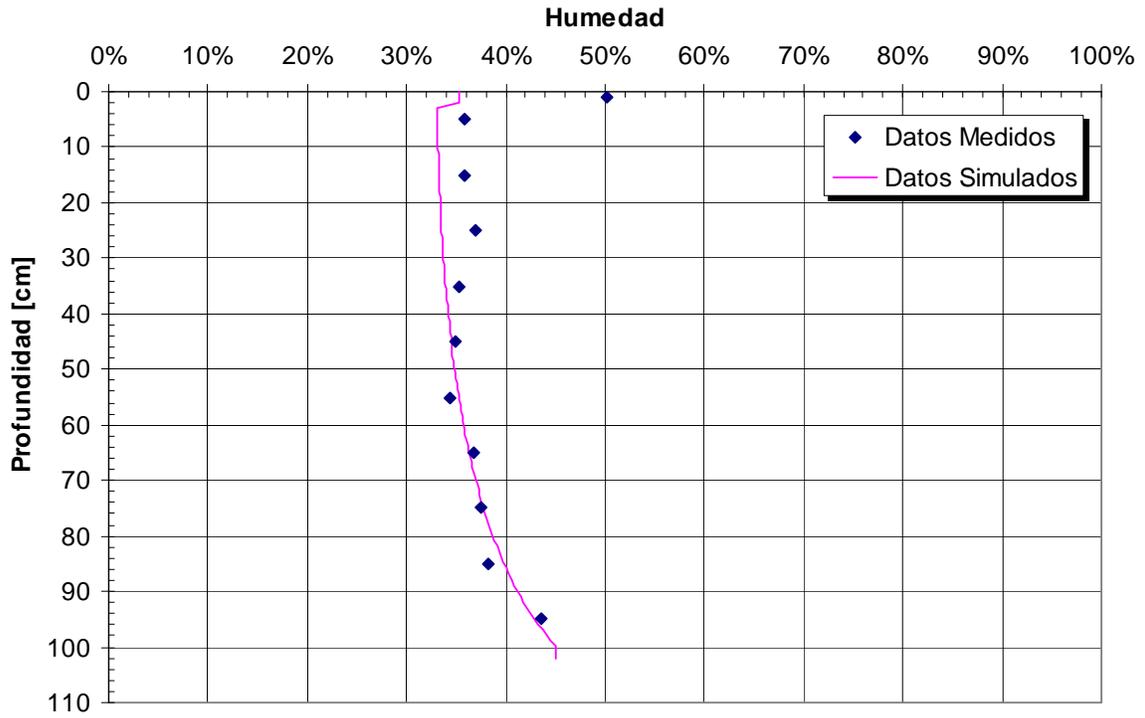


Figura A7.23
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₆B (Perfil Real)

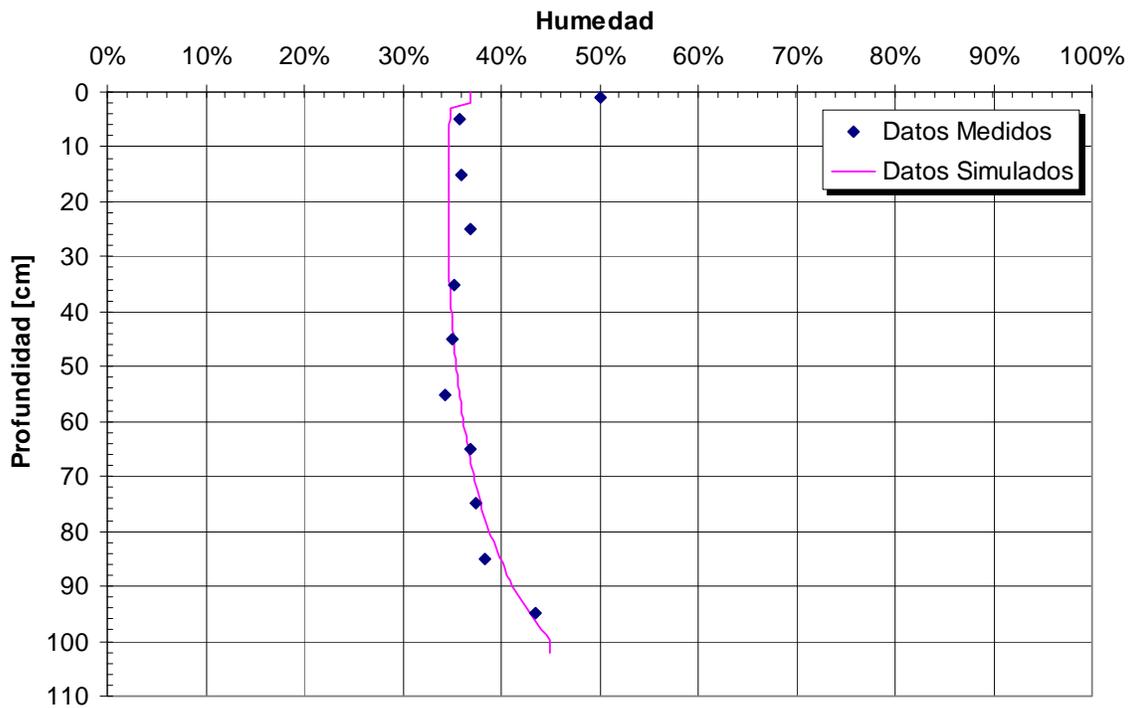


Figura A7.24
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₆A (V₂)

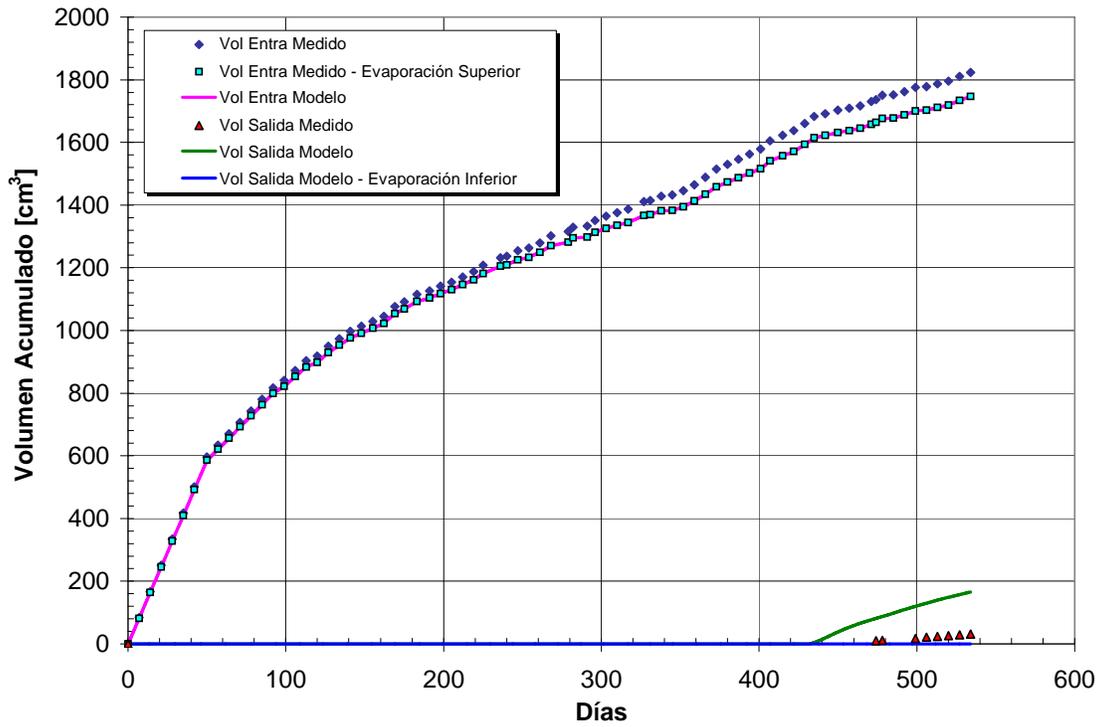
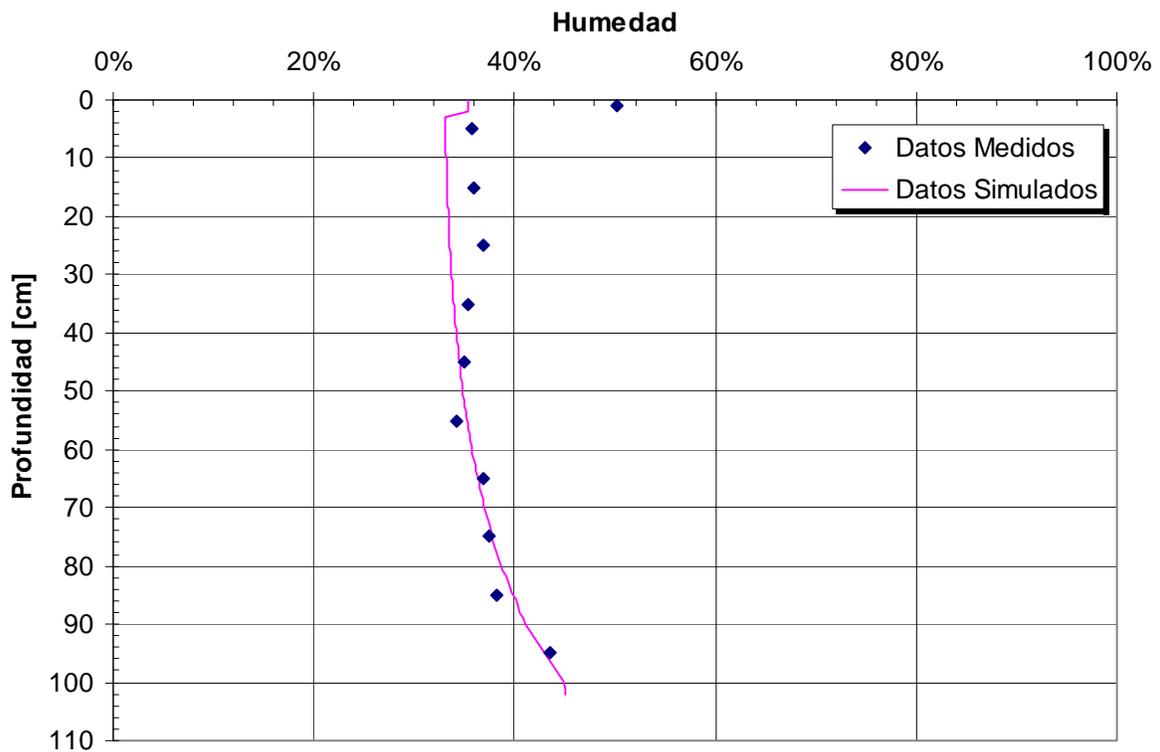


Figura A7.25
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₆A (V₂)



A7.6 Columna S7A y S7B

Figura A7.26
Volúmenes Acumulados Columnas S7A y S7B

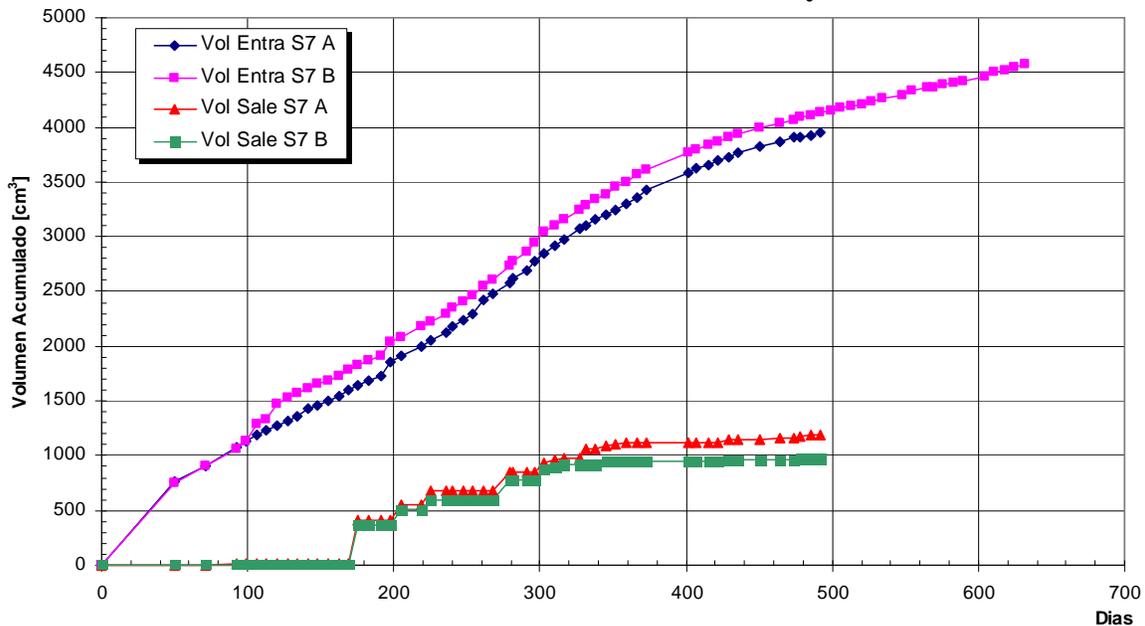


Figura A7.27
Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S7A

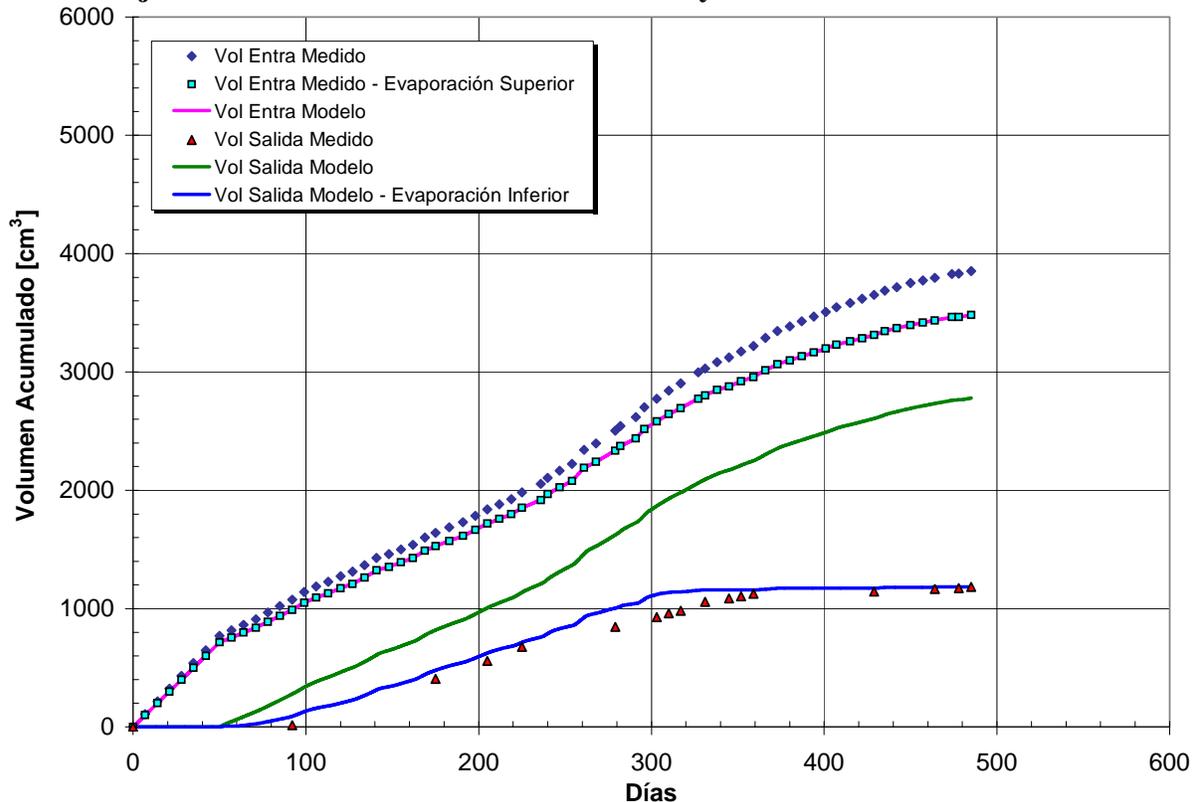


Figura A7.28

Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₇B

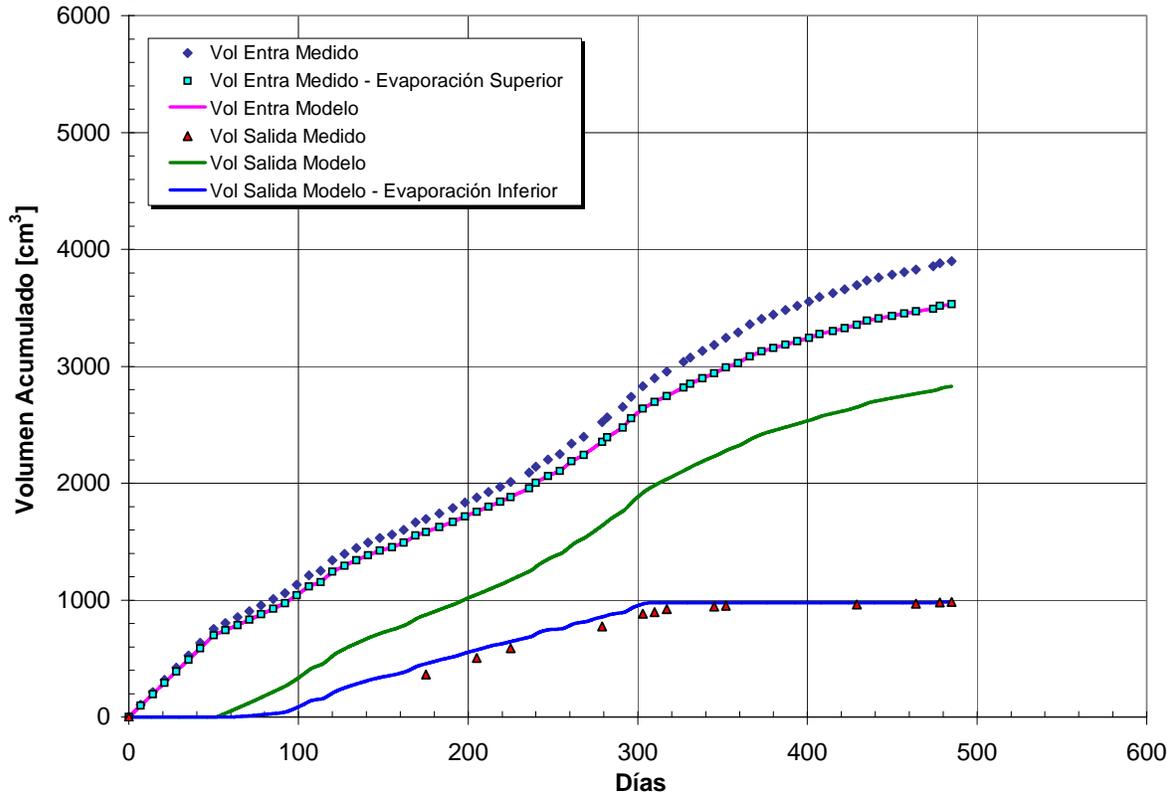


Figura A7.29

Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₇A

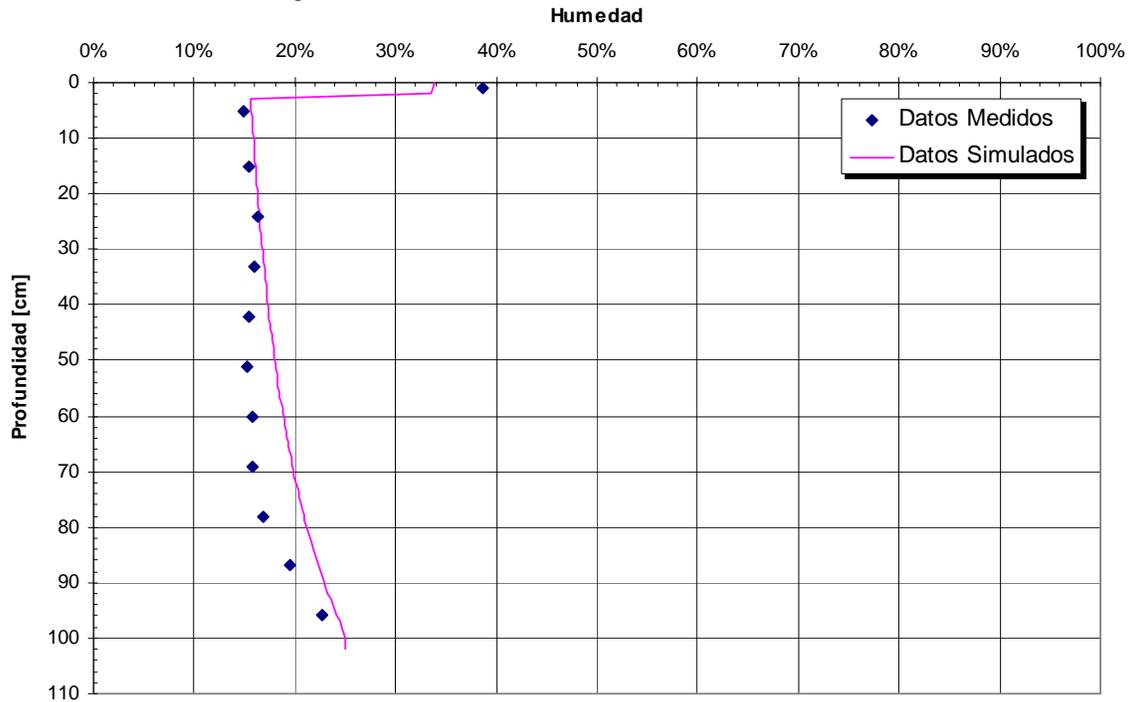
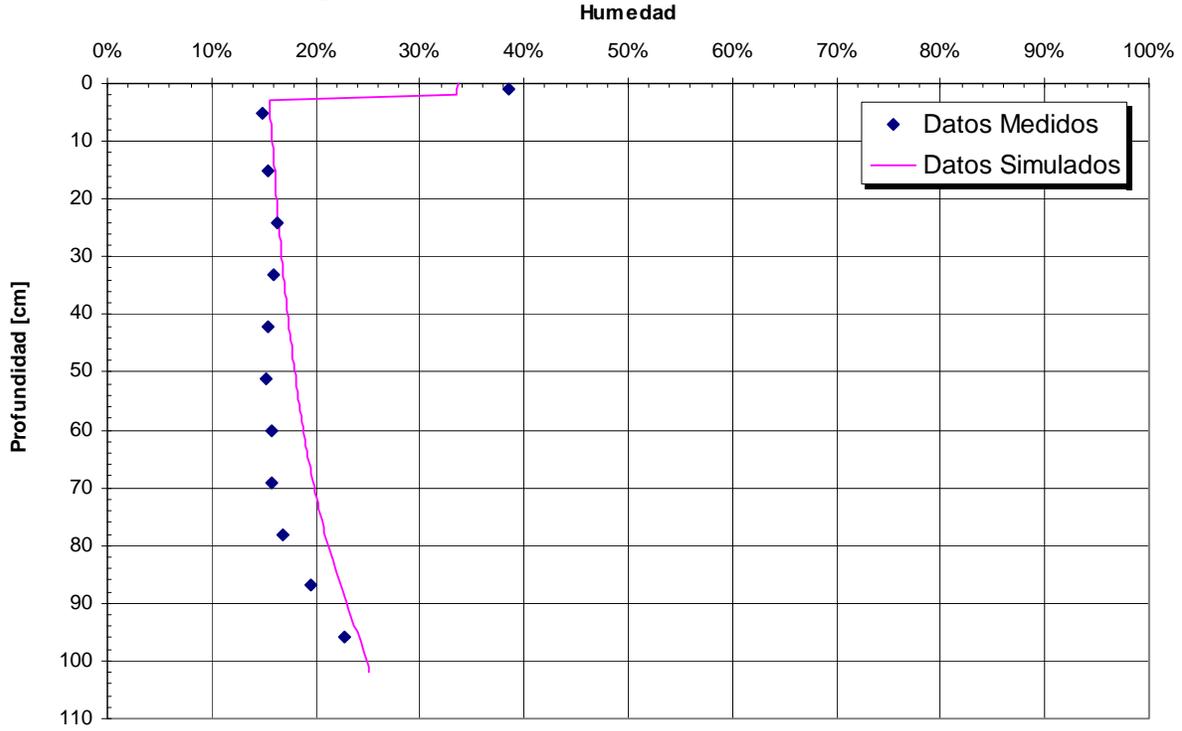


Figura A7.30
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₇B



A7.7 Columna S₈A y S₈B

Figura A7.31
Volúmenes Acumulados Columnas S₈A y S₈B

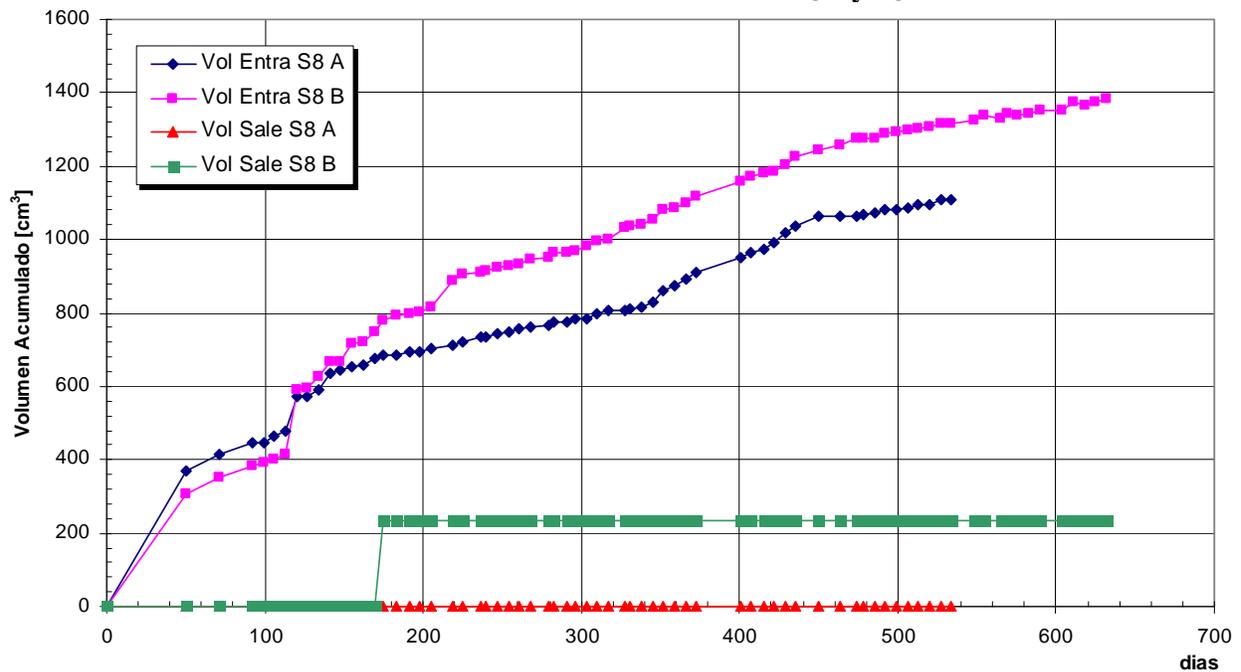


Figura A7.32

Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₈A

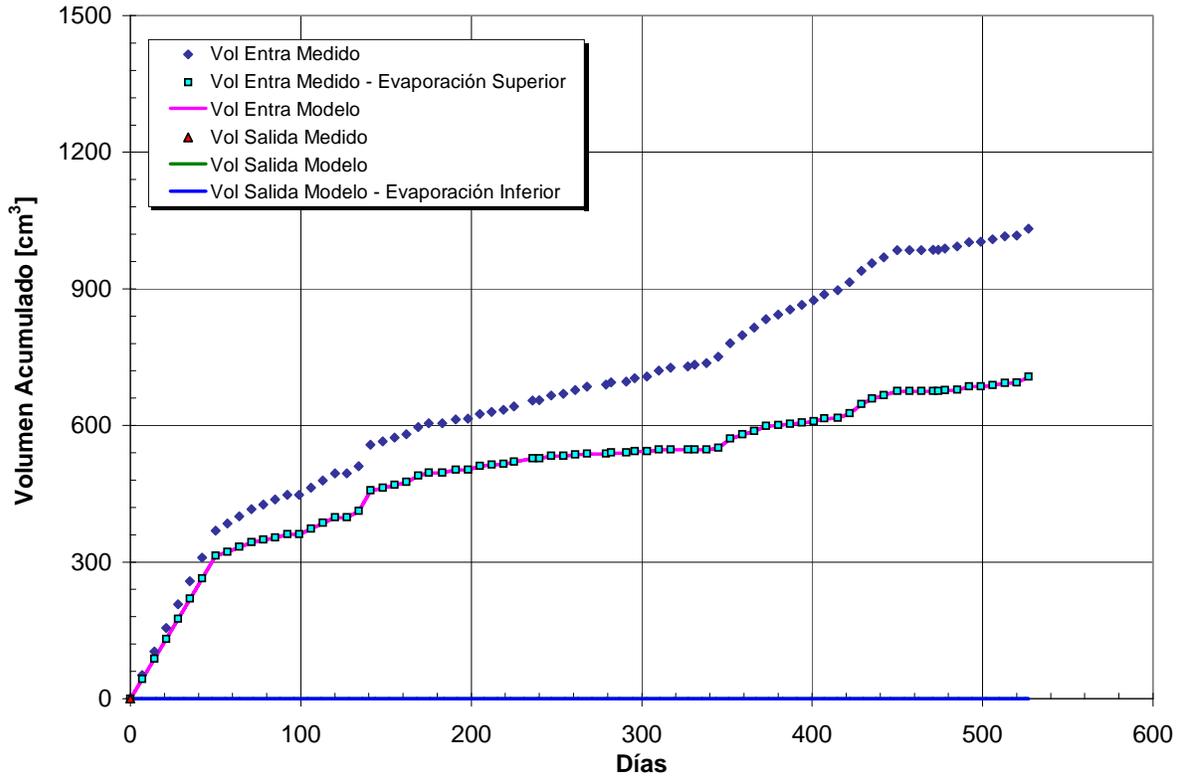


Figura A7.33

Ajuste Volúmenes Acumulados Simulados y Observados Columna S₈B

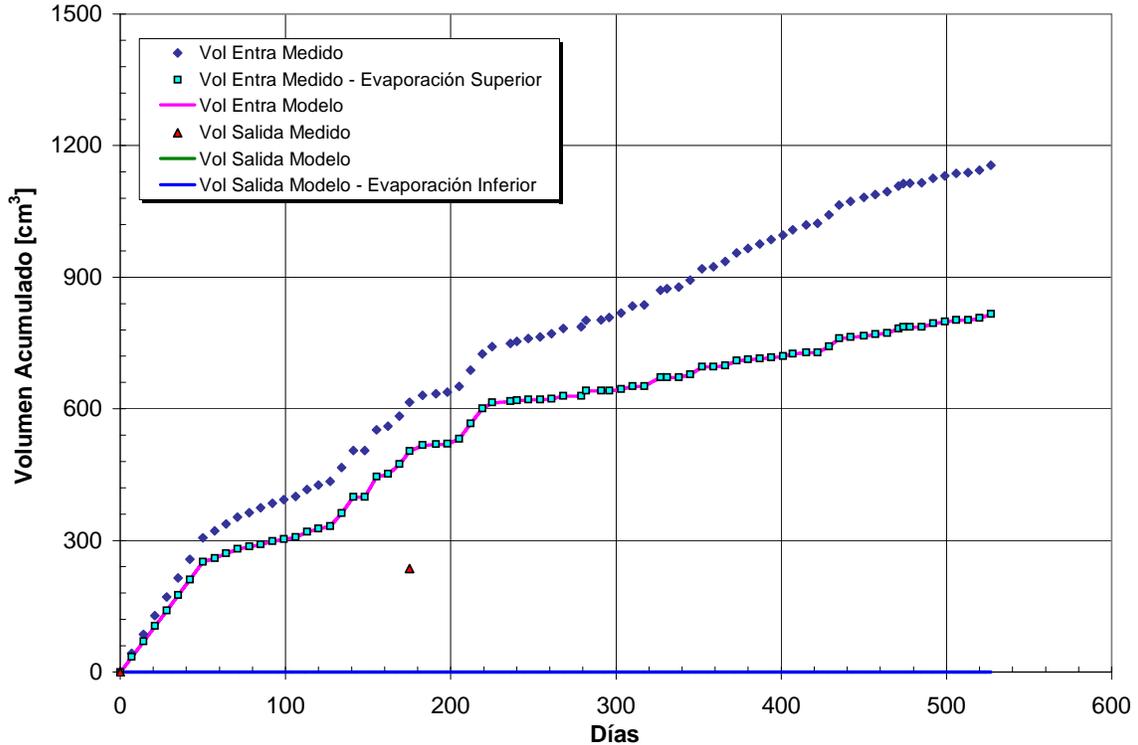


Figura A7.34
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₈A

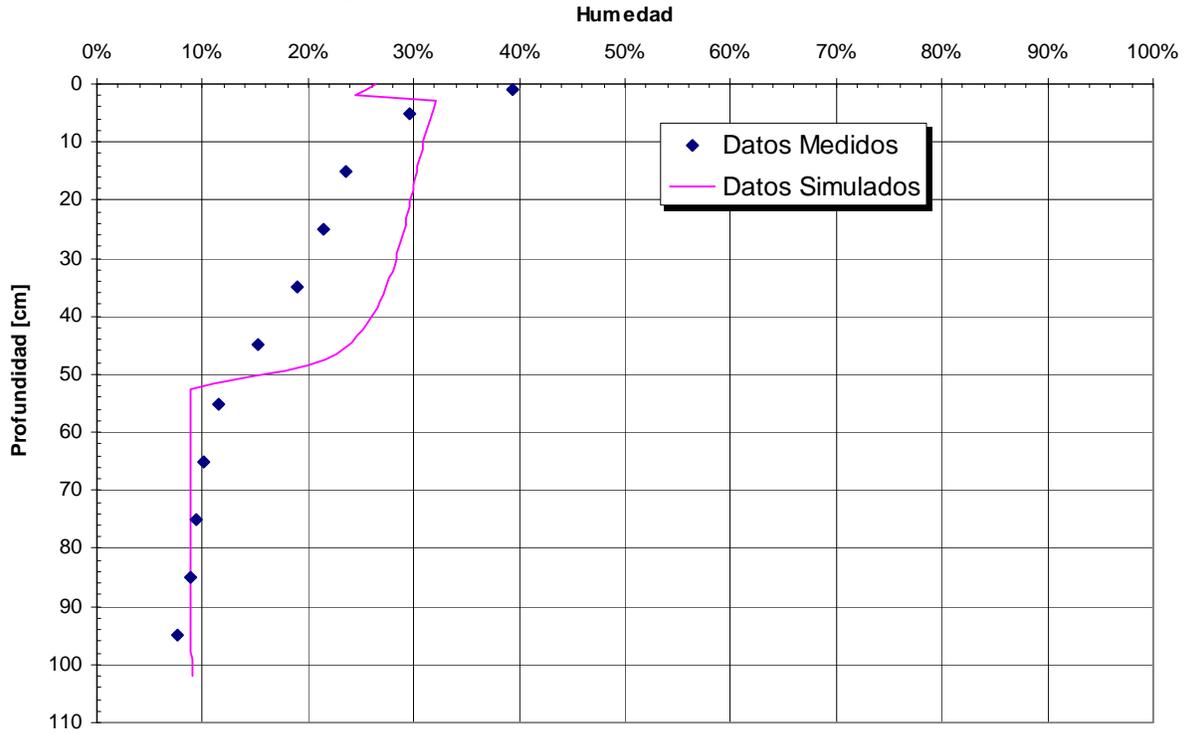


Figura A7.35
Ajuste de Perfil de Humedad Columna S₈B

