



Universidade da Coruña



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

TESIS DOCTORAL

LOS SERRINES DE GRANITO COMO BARRERA DE
IMPERMEABILIZACIÓN PARA SU USO EN VERTEDEROS

POR

ISMAEL FALCÓN SUÁREZ

DIRECTORES

Dr. JORDI DELGADO MARTÍN

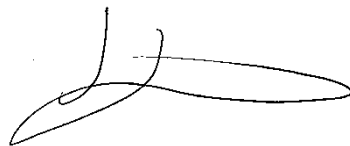
Dr. RICARDO JUNCOSA RIVERA

D. **Jordi Delgado Martín**, Profesor titular de la Universidade da Coruña en el área de ingeniería del terreno y D. **Ricardo Juncosa Rivera**, Profesor titular de la Universidade da Coruña en el área de ingeniería del terreno,

HACEN CONSTAR QUE:

La memoria “LOS SERRINES DE GRANITO COMO BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN PARA SU USO EN VERTEDEROS” ha sido realizada por D. **Ismael Falcón Suárez**, bajo nuestra dirección en el Departamento de Tecnoloxía da Construcción, y constituye la Tesis que presenta para optar al Grado de Doctor en Ingeniería Civil de la Universidade da Coruña.

A Coruña, 06 de junio de 2011



Fdo: *Dr. Jordi Delgado Martín*



Dr. Ricardo Juncosa Rivera

RESUMEN

La clausura y sellado de vertederos constituye un problema de alcance regional e internacional. La eficacia de la impermeabilización, tanto del contorno como de la capa de sellado superficial, es de vital importancia a la hora de evitar la contaminación y su propagación hacia el medio receptor. El empleo de materiales finos residuales de procesos industriales como alternativa a otros materiales sintéticos (p. ej. geo-textiles o geo-membranas), constituye una alternativa de gestión de residuos sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

El trabajo de investigación que se presenta en esta memoria tiene como objetivo principal el estudio de la viabilidad del uso de unos materiales finos generados por la industria productora y transformadora del granito en Galicia (*serrines de granito*) de cara a su uso como materia prima para la construcción de barreras de impermeabilización y/o sellado. En el mismo, se pretende verificar el comportamiento de los serrines de granito en el contexto de la obra civil a la escala de la actuación real sobre el terreno, empleando modelos experimentales a escala reducida que ponen en evidencia sus propiedades geotécnicas y geoquímicas, ampliamente caracterizadas a lo largo de los pasados años a través de procedimientos normalizados de uso convencional en el campo de la ingeniería civil.

Los modelos experimentales han sido diseñados de acuerdo con un amplio planteamiento metodológico y desarrollados empleando la instrumentación disponible más adecuada, de modo que permitiesen obtener información de diversa naturaleza en relación con el problema estudiado: i) la evolución geoquímica de los serrines de granito como resultado de su interacción con el agua y el aire; ii) el comportamiento hidrodinámico del material bajo condiciones específicas de compactación e hidratación; iii) alternativas de configuración como barrera física para el control del flujo de infiltración.

Para ello, se han desarrollado hasta cuatro ensayos con columnas de serrín de dimensiones reducidas. Dichas columnas fueron dotadas de equipos para llevar a cabo un seguimiento en tiempo real del comportamiento de los serrines bajo las condiciones de ensayo prescritas. Los diseños experimentales permitieron reunir una importante cantidad de información pertinente al problema investigado, contribuyendo al análisis en profundidad de distintos problemas de índole hidrogeoquímica, hidrodinámica y/o mineralógica.

Los ensayos en columna pusieron en evidencia que las propiedades hidráulicas de los serrines de granito, en relación con su uso como barrera de impermeabilización y sellado, contrastan con las observadas por otros autores a partir de ensayos geotécnicos convencionales. Reconociendo las limitaciones hidráulicas del material, intentamos mejorar su rendimiento empleando una configuración basada en las propiedades de las barreras capilares. Este ensayo se materializó en forma de un modelo reducido construido *ex profeso* para investigar el

comportamiento hidromecánico de barreras de materiales finos a escala casi-real. Las dimensiones y robustez del dispositivo experimental (objeto de una patente), permitieron el empleo de máquinas de compactación habituales en ingeniería civil (p.ej. bandejas vibrantes), alcanzándose condiciones óptimas de compactación. El dispositivo se equipó con un sistema de riego automatizado (con el cual se simularon condiciones realistas de precipitación) y diferentes sensores para control de la humedad del material ensayado.

Los resultados obtenidos sugieren que los serrines de granito, dispuestos en forma de una capa continua de material, no cumplen con las prescripciones para la construcción de barreras minerales de impermeabilización y/o sellado de vertederos. Sin embargo, la configuración de barrera capilar (combinando capas minerales de serrines y arena) ha demostrado producir un efecto de oposición al flujo de infiltración, cuya permeabilidad equivalente resulta inferior al límite máximo exigido para el confinamiento de vertederos de residuos inertes, por lo que su uso en este tipo de contextos resultaría adecuado.

El uso de los serrines de granito como barrera mineral para impermeabilización y/o sellado de vertederos o con otros fines, permitiría valorizar un residuo inerte, dándole un uso sostenible y contribuyendo positivamente en la cadena de valor de la roca ornamental.

ABSTRACT

Landfill closure and reclamation is both a regional and an international problem. The waterproofing performance of the cover layer has a capital importance when considering the prevention of pollution and its propagation towards the natural environment. In that context, the use of waste fine materials derived from industrial processes emerges as an alternative to the more conventional geosynthetics. Being that the starting point, our approach represents a sustainable waste management alternative, as well as also being environmental friendly.

The research work presented in this document is aimed at studying the feasibility of the use of the waste fine material produced by the dimension stone cutting and polishing industries (an important economic activity in the southern part of Galicia) also known as “granite saw dust”. Our work is focused on the use of granite saw dust as raw materials for the construction of landfill cover/capping layers or to construct impervious substrates acting as sealing barriers.. Our work is based on previous studies and characterization and we have tried to verify the behavior of granite saw dust in the context of civil works at scales larger than those more conventional in the laboratory. By using small-scale experimental set ups we have highlighted the selected geotechnical and geochemical properties.

Our experimental models have been designed according to a comprehensive methodological approach and were developed using the best instrumentation available to us. That let us to obtain a varied bundle of information related to the studied problem: i) the geochemical evolution of granite saw dust as a result of their interaction with water and air; ii) the hydrodynamic behavior of the material under prescribed conditions of compaction and water content; iii) alternatives for the configuration of hydrodynamic barriers to cope with inflows.

For this purpose, four small-scale column tests with granite saw dusts have been performed. These columns were instrumented to monitor, in real time, the behavior of the saw dust under the previously specified test conditions. The huge amount of information provided by the experiments has contributed to a detailed analysis of different problems covering hydrochemical, hydrodynamic and/or mineralogical aspects.

The column experiments have highlighted that, in relation to their use as a waterproofing and sealing barrier, the hydraulic properties of granite fines, were poorer than those estimated by other authors using conventional geotechnical tests. By recognizing the hydraulic limitation of the granite saw dust, we tried to improve its performance combining them with sand layers in order to make up a capillary barrier. This test was executed with a large -scale model which was specifically designed and built to study the hydrodynamic behavior of fine material barriers in a nearly field scale. The large size and robustness of the experimental device (for which a patent has been granted) allowed us to use conventional mechanical compaction devices typically used in earth works (e.g. vibratory or tamping rammers), reaching optimum

compaction values. The experimental device was equipped with an automated irrigation system (which allowed the establishment of realistic rainfall conditions) and a number of transducers to monitor the moisture content of the fines.

The results obtained suggest that granite fines, arranged as a continuous layer, do not meet the requirements necessary for the construction of soil barriers for waterproofing and/or sealing landfills. However, with a capillary barrier configuration (i.e. combining layers of granite saw dust and sand) resulted in a good performance in terms of the permeability prescribed for seal/cover layers for inert waste landfill. Accordingly, such a configuration would be worth for this use.

The use of granite fines as mineral barriers for waterproofing and/or sealing landfills, or for any other purposes, would contribute in adding value to inert waste, providing it with a sustainable use and positively contributing to the chain value of dimension stone.

RESUMO

O peche e selado de vertedoiros sanitarios é un problema de nivel rexional e internacional. A eficacia da impermeabilización, así do contorno como da capa de selado da superficie, é de vital importancia na prevención da contaminación e a súa propagación ó medio receptor. O emprego de materiais finos residuais de procesos industriais como unha opción fronte a outros materiais sintéticos (por exemplo, xeotéxtiles ou xeomembranas) constitúe unha alternativa sostible para a xestión de residuos e respectuosa co medio ambiente.

A investigación presentada nesta memoria ten como principal obxectivo o estudo da viabilidade do uso dun material fino xerado pola industria produtora e transformadora do granito en Galicia (serraduras de granito) para o seu uso como materia prima para a construción de barreiras de impermeabilización e/ou selado. Na mesma, preténdese verificar o comportamento das serraduras de granito no contexto da obra civil ó nivel de actuación real sobre o terreo, empregando modelos experimentais a escala reducida que poñen en evidencia as súas propiedades xeotécnicas e xeoquímicas, amplamente caracterizadas nos últimos anos través de procedementos normalizados de uso convencional no campo da enxeñaría civil.

Os modelos experimentais foron deseñados de acordo cunha ampla formulación metodolóxica e desenvolvidos empregando a instrumentación dispoñible máis axeitada, de modo que permitisen obter información de natureza diversa en relación co problema estudado: i) a evolución xeoquímica das serraduras de granito como resultado da súa interacción coa auga e o aire; ii) o comportamento hidrodinámico do material baixo condicións específicas de alternativas de compactación e hidratación; iii) alternativas de configuración como unha barreira física para controlar o fluxo de infiltración.

Para isto, desenvolvéronse ata catro ensaios de columnas de serraduras de dimensións reducidas. Ditas columnas foron dotadas de equipos para levar un seguimento en tempo real do comportamento das serraduras nas condicións de ensaio prescritas. Os deseños experimentais permitiron reunir unha importante cantidade de información pertinente o problema investigado, contribuíndo á análise en profundidade de distintos problemas de índole hidroxeoquímica, hidrodinámica e/ou mineralóxica.

Os ensaios en columna puxeron en evidencia que as propiedades hidráulicas das serraduras de granito, en relación ó seu uso como unha barreira de impermeabilización e selado, contrastan coas observadas por outros autores a partir de ensaios xeotécnicos convencionais. Recoñecendo as limitacións hidráulicas do material, inténtase mellorar o seu rendemento empregando unha configuración con base nas propiedades das barreiras capilares. Este ensaio materializouse na forma dun modelo reducido construído ex profeso para investigar o comportamento hidromecánico de barreiras de materiais finos a escala case real. As dimensións e robustez do dispositivo experimental (obxecto dunha patente), permitiron o uso

de máquinas de compactación habituais en enxeñaría civil (por exemplo, bandexas vibrantes), alcanzando condicións óptimas de compactación. O dispositivo foi equipado cun sistema de irrigación automatizado (simulando as condicións realistas de precipitación) e diferentes sensores para o control da humidade do material ensaiado.

Os resultados obtidos suxiren que as serraduras de granito, dispostas en forma dunha capa continua de material, non cumpren cos requisitos para a construción de barreiras minerais de impermeabilización e/ou selado de vertedoiros. Con todo, a configuración de barreira capilar (combinando capas minerais de serraduras e area) demostrou producir un efecto de oposición ó fluxo de infiltración, no que a permeabilidade equivalente resulta inferior ó límite máximo esixido para o confinamento de vertedoiros de residuos inertes, polo que o seu uso en tales contextos sería apropiado.

O emprego das serraduras de granito como barreira mineral para a impermeabilización e/ou selado de vertedoiros ou con outros fins, permitiría valorizar un residuo inerte, dándolle un uso sostible e contribuindo positivamente na cadea de valor da pedra ornamental.

AGRADECIMIENTOS

Las actividades recogidas en la presente memoria han sido llevadas a cabo gracias a la colaboración de diversas instituciones, asociaciones, empresas y personas. A todas ellas, deseo transmitirle mi más cordial agradecimiento.

Al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, el cual me concedió la ayuda FPI (Ref. BES-2006-12506) que ha hecho posible el desarrollo de esta tesis. Los trabajos se han llevado a cabo al amparo de proyectos concedidos por el ministerio (BIA2005-07916-C02-01) así como por la Xunta de Galicia (PGIDT06PXIC176002PN), institución a la cual remito, igualmente, mis agradecimientos. Algunos de los equipos utilizados en el trabajo fueron adquiridos con cargo a los Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER) 2007/2013.

Al Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC), marco principal del desarrollo de los trabajos que se presentan en esta tesis, sin cuyos medios esto no hubiese sido posible. Con especial atención, quiero hacer llegar un sonoro “gracias” al estupendo equipo de personas que trabajan en el CITEEC, por acogerme y ayudarme en todo lo que he necesitado.

A las empresas que, de forma desinteresada, han colaborado con este proyecto de I+D, aportando equipos que han contribuido al desarrollo de la parte experimental de la tesis. En particular, me gustaría hacer constar el compromiso de las empresas *COMPOSAN* (www.composan.es) y *AQUALIFE NEBUSYSTEM* (www.aqualife.com).

Al instituto de investigación alemán *BGR (Hanover; Berlín)*, donde se ha realizado parte de los trabajos experimentales, por los medios físicos y el entusiasmo humano con los que han contribuido en este proyecto. Junto al BGR, agradezco al *GRC (Cardiff University)* y a la Universidad de Castilla la Mancha, haberme permitido realizar estancias en sus centros de investigación, con las cuales se ha podido expandir el alcance del proyecto inicial de tesis.

Nuestro trabajo se ha enmarcado dentro del contexto de distintas colaboraciones mantenidas con la Asociación Galega de Graniteiros, y de modo especial agradecemos la colaboración y buena disposición de D. José Ángel Lorenzo Ramírez, Dña. Ángela González Campos, D. Jesús Herranz Areal, D. Gumersindo Alonso Xestoso, D. José Luis De la Hoz Arjones, D. Manuel Liboreiro Pérez, a los Servicios Xerais de Apoio a Investigación de la Universidade da Coruña y a la OTRI.

A mis directores de tesis Ricardo y Jordi: gracias por lo que habéis hecho conmigo y de mí.

Vamos ahora con una historia, la mía.

...1.30 a.m. del 15 de mayo de 2011. Entro por la puerta de casa con un borrador de la tesis, mi regalo de cumpleaños... la Rake duerme. Es un buen momento para recordar.

-¡Que no le metas el dedo en el ojo a los pescados, majadero!- me reprendía sí, pero con qué alegría me paseaba por el mercado-. Obviamente, en estos momentos me acuerdo de ti, abuelo. Supongo que se mezclan el sentimiento de la gratitud y la nostalgia. Sea como fuere, me la hiciste buena: con la de cosas que me enseñaste y se te olvidó decirme cómo funciona esta dichosa pluma que me diste para que firmara la tesis. La llevo clara. Bueno, le pondré cabezonería, te lo debo.

Recuerdo a un sabio sentarse a mi lado, mi primo Juan Carlos Falcón Millán. Su infinita curiosidad por las cosas me cautivó. Él es, sin duda, el gran culpable de que ahora esté escribiendo esto.

Recuerdo a mis amigos Sabi, Rechi, Cafru, Pichi u Ojeda, cabalgar y tropezar por Granada mientras aprendíamos que la asignatura más importante de la carrera no la impartían en las aulas; reconociendo en una mirada de complicidad, todo lo que se necesita saber.

Recuerdo a Santi en la popa de un barco, mano a mano con unos testigos que venían de muy profundo en el océano, gozando con la emoción de la aventura. O a Rubos, sentado en un despacho a mi lado, disfrutando el uno del otro durante una jornada de trabajo en la que alternaban tensión e improvisados musicales... ¡qué grandes actuaciones!

Recuerdo al Friski, al Chemilla y al Pinche, cargando y compactando sacos de lealtad. Al final, chicos, llenaron mi modelo. No sois los únicos. No me hace falta demasiada memoria para recordar cómo me abrieron los brazos, desde mi llegada a la UDC, todos los compañeros que forman este equipazo: Ana, Víctor, Javi, Silvia, Bruno, Santi, Emilio, Sara...es un verdadero orgullo haberles conocido.

Recordar a Félix y Andrea, apareciendo por el despacho con una sonrisa, anécdota o con un “¿te ayudo?”, es reconocer a dos enfermeros con una potente medicina para la obsesión...en general, el CITEEC tiene un muy buen equipo médico. Ha resultado ser un excelente hospital.

Más recientemente, recuerdo a un señor devorando un documento en un despacho de la segunda planta de la escuela, cuya posición encorvada, a causa de una letra demasiado pequeña, contrastaba con la elegancia de una persona de esas como hay pocas, extraordinaria. Gracias por todo Jordi.

Ancor y Juanjo, mis fieles amigos, también me acuerdo de ustedes, y mucho. De ustedes y de la gran cantidad de amigos y familiares que quedaron lejos cuando comencé este camino: mis tíos y tías, mis primos, mis padres, mis hermanas... y, por su puesto, me acuerdo de los que ya no están.

Bueno, se está haciendo tarde. Acabo de recordar que la Rake sigue en la cama. Intentaré no despertarla; sólo me queda susurrarle una cosilla y... se acabó el día.

Gracias a todos por llenarme de estos recuerdos... allá voy abuelo:

Himar

A mis hermanas,

Mercedes y Sara.

A mi padre y a mi madre.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1 Estado del Arte	4
1.1 Serrines de Granito.....	4
1.2 Estado Actual de las Investigaciones	5
2 Contexto Político, Económico y Medioambiental	6
2.1 Explotación del Granito	7
2.2 Gestión de Residuos	8
3 Motivación	9
3.1 Los Serrines de Granito en el Marco de la Ingeniería Civil	9
3.2 La Importancia de los Modelos Experimentales.....	10
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	13
1 Objetivo General	15
2 Objetivos Particulares	15
3 Estructura de la Tesis	15
3.1 Columna para Análisis Hidrogeoquímico de Materiales Granulares	16
3.2 Columna con Sensores de Humedad y Succión	17
3.3 Tanque de Electrodo.....	17
3.4 Dispositivo <i>ES-2345472-B1</i>	18
CAPÍTULO 3. ENSAYO DE HIDRATACIÓN, DESHIDRATACIÓN Y ENVEJECIMIENTO EN SERRINES DE GRANITO	21
1 Introducción	23
2 Instrumentación	24
2.1 Elementos de la Columna	24
2.2 Calibración de Equipos	25
2.2.1 La Herramienta SIPLab	26
2.2.2 GeoScanner ITRAX.....	26
3 Materiales y Métodos	27
3.1 Montaje del Ensayo	28
3.2 Monitorización y Procesamiento de Datos	29
3.2.1 Fase de Hidratación.....	29
3.2.2 Fase de Deshidratación	30
3.2.2.1 Aplicación Geoquímica de la Extracción con Rhizon.....	31

3.2.2.2 Aplicación Hidrodinámica de la Extracción con Rhizon	32
3.2.3 Fase de Envejecimiento	35
4 Resultados.....	36
4.1 Fase de Hidratación	36
4.2 Fase de Deshidratación	39
4.2.1 Aspectos Geoquímicos del Ensayo	40
4.2.1.1 Análisis Físicoquímico	40
4.2.1.2 Análisis Composicional	44
4.2.2 Aplicación Hidrodinámica	51
4.2.2.1 Curvas Experimentales $K-S_w$	54
4.2.2.2 Validación de Resultados de las Curvas Experimentales $K-S_w$	56
4.3 Fase de Envejecimiento	58
4.3.1 Análisis EDXRF de la Columna	59
4.3.2 Análisis de Secciones Pulidas Mediante Microscopía Electrónica	59
4.3.2.1 Zona Superior de la Columna	59
4.3.2.2 Zona Media de la Columna	61
4.3.2.3 Zona Inferior de la Columna	62
5 Discusión de Resultados	63
5.1 Análisis Hidrogeoquímico	63
5.1.1 Análisis Físicoquímico	63
5.1.2 Análisis Composicional	64
5.2 Análisis Hidrodinámico	64
5.3 Análisis Mineralógico	65
CAPÍTULO 4. MODELOS EXPERIMENTALES DE FLUJO EN SERRINES DE GRANITO NO SATURADOS	67
1 Introducción	69
2 Instrumentación	70
2.1 Columna con Sensores de Humedad y Succión	71
2.2 Tanque de Electrodo	75
3 Materiales y Métodos	76
3.1 Construcción de los Ensayos	77
3.2 Seguimiento y Procesado de los Datos	79
3.2.1 Tratamiento de los Datos de los Ensayos en el Cilindro de Metacrilato	80
3.2.2 Tratamiento de los Datos del Ensayo en el Tanque de Electrodo	82
3.3 Modelización. El Código COMPASS	83
4 Resultados.....	84
4.1 Cilindro de Metacrilato. ENSAYO 1.	84
4.1.1 Balance Hídrico	84
4.1.2 Sondas de Capacitancia	85
4.1.3 Psicrómetros	86

4.1.4 Modelización	88
4.2 Cilindro de Metacrilato: ENSAYO 2.....	95
4.2.1 Balance Hídrico	95
4.2.2 Resultados de las Sondas de Capacitancia	96
4.2.3 Psicrómetros	99
4.2.4 Análisis de los Lixiviados.....	100
4.2.5 Conductividad Hidráulica	101
4.2.6 Desmantelamiento del ENSAYO-2. Análisis Geoquímico del Material.....	103
4.3 Tanque de electrodos: ENSAYO 3.....	105
4.3.1 Balance Hídrico	106
4.3.2 Evolución del Estado de Saturación de la Columna	106
5 Discusión de Resultados	111
5.1 Aplicabilidad de las Distintas Técnicas de Caracterización.....	111
5.2 Parámetros Hidráulicos en Serrines de Granito	113
5.3 Repercusión del Lavado de Serrines de Granito en el Material de Contorno	114
CAPÍTULO 5. DISPOSITIVO DE BARRERA CAPILAR CON SERRINES DE GRANITO.....	115
1 Introducción	117
1.1 Funcionamiento de las Barreras Capilares	118
2 Objetivos Particulares del Ensayo	119
3 Instrumentación	119
4 Materiales y Métodos.....	121
4.1 Selección del Método de Compactación y Procedimiento de Muestreo	121
4.2 Construcción.....	126
4.3 Propiedades de los Materiales	128
4.4 Ejecución de los Ensayos sobre la Barrera Capilar	130
4.4.1 Simulación de una Secuencia Pluviométrica Realista	130
4.4.2 Simulación de Ciclos de Humectación-Secado	132
5 Resultados.....	133
5.1 Experimento de Hidratación con una Secuencia de Precipitación Realista	133
5.2 Experimento con Ciclos Hidratación-Aireación	136
5.3 Interpretación de los Resultados.....	140
6 Principales Conclusiones del Ensayo	142
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES	145
1 Valoración de Resultados	147
1.1 Recapitulación de los Resultados Experimentales	147
1.1.1 Análisis Hidrogeoquímico.....	147

1.1.2 Análisis Hidrodinámico	148
1.1.3 Análisis Estructural y Mineralógico	149
1.2 Marco Legal de la Eliminación de Residuos Mediante Depósito en Vertederos	149
1.3 Serrines como Barrera Mineral para Impermeabilización en Vertederos.....	150
2 Conclusiones	152
3 Otras Líneas de Investigación	156
CAPÍTULO 7. GENERAL DISCUSION AND CONCLUSIONS.....	159
1 Results Assesment.....	161
1.1 Summary of Experimental Results.....	161
1.1.1 Hidrogeochemical Analysis.....	161
1.1.2 Hydrodynamic Analysis	162
1.1.3 Structural and Mineralogical Analysis	162
1.2 Legal Context for Landfill Disposals	163
1.3 Granite Fines as Mineral Barriers in Waterproofing Landfills.....	164
2 Conclusions	165
ANEXO I. EL ENSAYO PRÓCTOR EN CALIBRACIÓN INSTRUMENTAL	171
1 Calibración Instrumental	173
1.1 Normalización y Trazabilidad	173
2 El Ensayo Próctor.....	174
Anexo I.A Medida de la Densidad de Suelos de Grano Fino Empleando un Escáner-Láser 3D	177
1 Introducción.....	177
2 Materiales y Métodos.....	178
2.1 El Escáner Láser 3D.....	178
2.1.1 Precisión de las Medidas.....	179
2.2 Muestras de Suelo. Determinación de Densidades.....	181
3 Resultados	182
4 Resumen de los resultados obtenidos.....	185
Anexo I.B Calibración de la Respuesta Eléctrica de los Serrines de Granito	187
1 Introducción.....	187
2 Materiales y Métodos.....	188
2.1 Herramienta SIPLab.....	188
2.2 Adquisición de Datos	189
2.3 Aproximaciones Empíricas	190
3 Resultados	191
4 Resumen del Proceso de Calibración.....	193
Anexo I.C Calibración de Sondas de Capacitancia para los Serrines de Granito	195
1 Introducción.....	195
2 Materiales y Métodos.....	196

2.1 Sonda ECHO EC-5	196
2.2 Adquisición de Datos.....	197
3 Resultados	197
4 Resumen del Proceso de Calibración	198
ANEXO II. FOTOS DE LOS DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES.....	199
Anexo II.A Columna para Análisis Hidrogeoquímico de Materiales Granulares.....	201
Anexo II.B Columna con Sensores de Humedad y Succión	203
Anexo II.C Tanque de Electrodo.....	205
Anexo II.D Dispositivo ES-2345472-B1	207
ANEXO III. CONTRIBUCIONES ACADÉMICAS DE LA TESIS.....	211
Anexo III.A Publicaciones.....	213
Anexo III.B Congresos	213
Anexo III.C Patentes	213
REFERENCIAS.....	215

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

1 Estado del Arte	4
1.1 Serrines de Granito	4
1.2 Estado Actual de las Investigaciones	5
2 Contexto Político, Económico y Medioambiental	6
2.1 Explotación del Granito	7
2.2 Gestión de Residuos	8
3 Motivación	9
3.1 Los Serrines de Granito en el Marco de la Ingeniería Civil	9
3.2 La Importancia de los Modelos Experimentales	10

Los vertederos controlados¹ son obras de ingeniería que constituyen instalaciones de eliminación destinadas al depósito de residuos tanto en la superficie, como bajo tierra. Se diseñan normalmente sobre depresiones del terreno, artificiales o naturales, en las cuales se compacta e impermeabiliza el fondo y los laterales. La eficacia del proceso de impermeabilización, tanto de los contornos como de la capa de sellado superficial, resulta de vital importancia de cara a evitar la contaminación del sistema agua-suelo circundante.

La clausura y sellado de vertederos constituye un problema de dimensiones regionales e internacionales. Asimismo, donde los vertederos constituyen una solución al problema de la gestión de residuos, es importante que su construcción se verifique a través de los más estrictos controles.

El uso de materiales finos en la constitución de capas de sellado y/o impermeabilización de vertederos no es nuevo, pudiendo citarse entre otros los residuos de distintos procesos industriales tales como cenizas volantes, fangos de depuradora o la fabricación de áridos (Fraser y McBride, 2000; ICAR, 2000; Vaquero, 2004; Quadri *et al.*, 2008).

El empleo de tales materiales como alternativa a otros materiales sintéticos (p. ej. geo-textiles o geo-membranas) constituye, en sí mismo, una política de gestión de residuos. En contraposición con las ventajas económicas y medioambientales ofrecidas por los finos, se presenta como obstáculo el escaso conocimiento del comportamiento particular de cada uno de ellos en exposición directa a los agentes ambientales a medio y largo plazo.

El diseño y construcción de barreras para impermeabilización y/o sellado con materiales finos debe ir precedida de un análisis detallado de sus características. Entre ellas se incluye:

- ◆ Caracterización de las propiedades del material objeto de estudio empleando, para ello, metodologías normativas.
- ◆ Ensayos en laboratorio a escala reducida, bajo condiciones de simulación controladas.
- ◆ Ensayos piloto a escala real o cuasi-real² que permitan abordar el estudio del comportamiento del material bajo las condiciones de trabajo y exposición esperadas.

El trabajo de investigación que se presenta en esta memoria aborda el estudio de la viabilidad en cuanto al uso de un material fino (conocido como *serrines de granito*), como materia prima para la construcción de barreras de impermeabilización y/o sellado. Para ello, partiendo de la amplia caracterización física, química y mecánica llevada a cabo sobre este material durante los últimos años (Barrientos *et al.*, 2004; Vázquez, 2005; Delgado *et al.*, 2006; Barrientos, 2007; Vázquez *et al.*, 2007; Navarro *et al.*, 2008; Carro, 2009; Barrientos *et al.*, 2010), hemos desarrollado diferentes modelos experimentales a través de los cuales se ha evaluado su

¹ También conocidos como rellenos sanitarios, vertederos urbanos o vertederos municipales.

² Con dimensiones reducidas respecto a una aplicación real.

comportamiento en referencia a su capacidad como limitante del flujo de infiltración, desde la perspectiva del control detallado que ofrecen los ensayos de laboratorio a pequeña escala.

1 ESTADO DEL ARTE

1.1 SERRINES DE GRANITO

El término serrines de granito¹ se aplica a aquellos materiales de granulometría fina (limo-arcilla), generados durante las operaciones de corte, pulido y acabado de bloques de roca granítica extraídos de canteras.

El proceso de corte de los bloques de cantera suele llevarse a cabo mayormente mediante el empleo de telares de corte con flejes de acero refrigerados con agua, la cual transporta una carga de granalla de acero. Durante este proceso, el agua para la refrigeración de los flejes y para la resuspensión de la granalla y finos es basificada mediante la incorporación de hidrato de cal.

El material residual del proceso de corte decanta en fangos de sedimentación, siendo espesado mediante filtros-prensa. Las tortas de los filtros presentan, en promedio, los siguientes valores aproximados²: 36% de agua, 0.5% de cal, 16% de granalla de acero y 47% de fragmentos minerales propios de las rocas sometidas al corte. Es a este residuo al que denominamos serrines de granito.

Los estudios desarrollados con serrines de granito o materiales semejantes, son relativamente recientes, tanto en el ámbito nacional como internacional. Hasta el año 2000, existen estudios referentes a la capacidad de los serrines como material fertilizante en suelos ácidos, debido a su marcado carácter alcalino (Coroneos *et al.*, 1995; Silva *et al.*, 2000).

En el año 2000, el *International Center for Aggregates Research* (ICAR) publicó un informe cuyo objetivo es promover la investigación y aplicación de los finos de granito, entendidos éstos como un subproducto de la industria de la roca ornamental con valor económico (ICAR, 2000).

Los investigadores del grupo *GEAMA*³ sacaron a la luz los primeros resultados concernientes a la caracterización de los serrines a partir de sus propiedades morfológicas, fisicoquímicas y geotécnicas básicas (Barrientos *et al.*, 2004; Vázquez, 2005; Barrientos, 2007). A raíz de esta caracterización, aparece un estudio en el que se abordan tanto su potencial contaminante, como sus posibles usos en el contexto de la ingeniería civil (Delgado y Juncosa, 2005).

¹ El término *serrines de granito* fue adoptado por el sector del granito gallego en contraposición a los términos *lodo* o *fango* cuya connotación en el ámbito medioambiental es de carácter negativa, de residuo.

² Porcentaje en peso.

³ Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universidad de la Coruña.

Vázquez (2005) presenta los resultados de un extenso trabajo relativo a la caracterización geoquímica de los serrines de granito, lo cual contribuyó a la inclusión de este material en la categoría de residuos inertes según establece la ITR/01.0/04, de la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia.

Menezes *et al.* (2005), propuso el empleo de los serrines de granito como materia prima para la industria cerámica, en tanto que estos materiales poseen una composición análoga a la de materias primas cerámicas convencionales.

La caracterización geotécnica detallada de los serrines de granito fue presentada a finales de 2007 (Barrientos, 2007), estableciéndose los parámetros fundamentales que rigen el comportamiento de este material, con resultados satisfactorios en cuanto a comportamiento en relación con distintas aplicaciones: rellenos localizados, terraplenes, barreras de impermeabilización, etc. A raíz de estos resultados, aparecen nuevos trabajos donde se emplean programas numéricos para simular tanto el comportamiento de los serrines de granito como material de relleno en terraplenes (Navarro *et al.*, 2008), como su posible uso en impermeabilización y/o sellado de vertederos municipales (Vázquez *et al.*, 2007). En ambos casos los resultados fueron halagüeños, impulsando el desarrollo de ensayos experimentales de verificación en ambas direcciones.

Con carácter más reciente aparece una publicación de aplicación directa de los serrines de granito en el marco propio de la gestión de residuos (Carro, 2009). En este trabajo, se estudian diferentes alternativas de estabilización de los residuos petroleados procedentes del hundimiento del *Prestige* frente a las costas gallegas en noviembre de 2002. Durante el proceso de estabilización del residuo, se sustituyó parte del agente estabilizante principal (cal viva), por serrines de granito, consiguiendo un efecto de bloqueo en la adhesividad del fuel que optimiza el proceso de estabilización.

Otros estudios de interés llevados a cabo en relación a este material incluyen: i) el análisis de las aguas superficiales de la comarca de Porriño (Pontevedra, España), a fin de comprobar el grado de incidencia de los vertidos de serrines en la calidad de las mismas (Peña *et al.*, 2006); ii) la determinación del punto isoeléctrico de los serrines de granito, cuyo valor denota cierta eficacia en referencia a la captura de cationes en disolución (Vázquez *et al.*, 2008).

1.2 ESTADO ACTUAL DE LAS INVESTIGACIONES

De los trabajos publicados en relación con los serrines de granito se pueden extraer una serie de hechos, que se resumen en los siguientes puntos:

- ◆ Los serrines de granito son materiales alcalinos de mineralogía análoga a la de la roca de la que proceden, con una incorporación significativa de cal y acero. El caso particular del acero tiene un efecto sobre el valor de densidad media de las partículas sólidas, el cual se ve incrementado respecto al de un granito normal hasta situarse en $\sim 3190 \text{ kg m}^{-3}$.

- ◆ El tamaño de grano es de tipo limo-arcilla, con baja plasticidad (LL ~40; LP ~32; IP ~8), clasificable dentro de la categoría ML del USCS.
- ◆ La superficie específica BET de los serrines ($\sim 8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) es muy inferior a la que observaríamos en materiales naturales de tamaño de grano similar (p.ej. limos o limos arcillosos).
- ◆ Los lixiviados estáticos evidencian por un lado, un marcado pH básico en las aguas que interactúan con los serrines, de muy baja alcalinidad, con lo que su efecto sobre las aguas naturales se prevé mínimo; y por otra parte, una concentración de metales inferior a la exigida, incluso para las aguas de consumo humano.
- ◆ La existencia de granalla y otras partículas de acero, al oxidarse parcialmente dan lugar a una fase mineral denominada green rust¹. La precipitación de estos minerales conlleva una importante absorción de metales del medio, que explicaría las bajas concentraciones registradas en los ensayos de lixiviados, con lo que la presencia de partículas férricas constituye un interesante factor beneficioso desde el punto de vista del comportamiento geoquímico de los serrines en condiciones naturales.
- ◆ Los parámetros hidrodinámicos obtenidos muestran que, compactados adecuadamente, los serrines cumplen con los requisitos exigidos para las capas de protección y sellado o recubrimiento de vertederos (RD 1481/2001; MMA, 2001).
- ◆ En relación con el empleo de los serrines de granito en obras de tierra, éstos cumplen con lo establecido en el artículo 330 (terraplenes) del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, PG-3 (MFOM, 2002).
- ◆ Por último, las características de plasticidad e índice plástico encuadrarían este tipo de residuo mineral dentro de la categoría de *marginales*, de acuerdo con el PG-3.

2 CONTEXTO POLÍTICO, ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL

En el año 2003, la Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible presentó el Plan de Gestión de Residuos Industriales y Suelos Contaminados de Galicia, en el que se hacía una estimación de residuos de extracción, prospección, preparación y otros tratamientos de minerales y canteras, cifrándolos en la alarmante cantidad de 55.024.482 Tn.

Este plan expone entre sus líneas prioritarias maximizar la prevención y valorización, y minimizar la eliminación (vertido).

¹ Conjunto de minerales de Fe^{2+} - Fe^{3+} isoestructurales con la piroaurita (grupo de la hidrotalcita), con estructura en capas de hidróxido (tipo bauxita), e interláminas en las que entran distintos aniones.

Del mismo modo, queda recogido en relación al sector de la piedra natural, que deben llevarse a cabo estudios de viabilidad encaminados a buscar el aprovechamiento de los residuos generados durante su actividad.

En el I Plan Nacional de Residuos de Industrias Extractivas Industriales (2008-2015 I PNRIE) se especifica que, entre los objetivos propuestos referentes a los residuos de las actividades extractivas se encuentra el *“Reciclaje de todos los residuos históricos (anteriores a 2006), generados por el subsector de la roca ornamental del granito y de mármol, objetivo a alcanzar antes de 2016”*.

En esta misma línea, el Plan recoge una serie de medidas previstas enfocadas al cumplimiento de los objetivos planteados: *“Las Administraciones Públicas establecerán ayudas a los Programas de I+D+i para mejorar las tecnologías de extracción de minerales, las de tratamiento de RIE y promover la búsqueda de nuevos usos posibles de estos residuos...”*

2.1 EXPLOTACIÓN DEL GRANITO

El sector de la industria productora y transformadora del granito en Galicia se organiza desde 2010 en torno al Clúster del Granito¹, el cual representa la asociación de referencia de esta industria a nivel autonómico. El Clúster nace de la unificación de las diferentes asociaciones que existían en el sector: Asociación de Canteiras de Galicia (ACG); Asociación de Graniteiros Gallegos (AGG); Asociación de Maquinaria para la Piedra (GALIMAC); Asociación de Marmolistas. Asimismo, el Centro Tecnológico del Granito se integra en el Cluster para garantizar la mejora de las capacidades del sector a través de I+D+i.

El Clúster del Granito recoge en su portal una serie de datos actualizados referentes a la explotación de granito en la provincia de Pontevedra. La transformación de los bloques de granito bruto en productos manufacturados de tipo ornamental, representa la actividad fundamental desempeñada. De acuerdo con sus estimaciones, en las canteras gallegas, en particular en Porriño (Vigo), se extraen cada año en torno a 600.000 Tn de bloques de granito, lo cual representa el 65% del granito de toda España. En volumen, la industria gallega es la segunda más importante de Europa (tras Italia) y la quinta del mundo.

La emergencia de China (y en menor medida Turquía e India), como importante productor y elaborador de granito en los últimos años, provocó a principios de la pasada década un importante cambio de estrategia en el sector, en tanto que los precios de sus productos en su salida al mercado son difíciles de igualar.

Una de las razones principales es la ausencia o menor exigencia de los controles de medio ambiente y laboral a los que son sometidos. En este sentido, la Federación Española de la Piedra Natural (FDP) planteó en el año 2004 que la industria de la piedra natural abordase su futuro en el marco de la perspectiva nacional de la I+D con el que agregar un valor de calidad a sus productos respecto del ofrecido por los países emergentes.

¹ www.clustergranito.com

Actualmente, Galicia compite con grandes países como China, India o Brasil, por delante de potencias como Sudáfrica, Turquía o Portugal. Para ello, ha optado por una estrategia de Responsabilidad Social Corporativa, que prima en aspectos clave para el desarrollo del sector como son: el Medio Ambiente, la prevención de riesgos naturales y la investigación e innovación tecnológica.

El ritmo de producción del año 2004 en la zona de Porriño, expresado en términos de cantidad de residuos procedentes de las actividades de explotación del granito, fue estimado en más de 350.000 Tn de serrines anuales. A día de hoy, y de manera aproximativa, las empresas asociadas al Clúster del Granito generan anualmente unas 220.000 Tn de serrines de granito. A pesar de este descenso, el volumen de residuos generados sigue siendo muy elevado.

2.2 GESTIÓN DE RESIDUOS

Los serrines de granito deben ser clasificados como materiales no peligrosos e inertes. Esta categoría engloba aquellos materiales que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas.

Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, no reaccionan física o químicamente ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las que entran en contacto de forma que puedan dar lugar a una contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana (CUE, 1999).

La clasificación de los residuos sólidos en la Comunidad Autónoma de Galicia se realiza conforme a la Ley 10/1997, de 22 de agosto (D.O.G. 180, 18.09.97) sobre residuos sólidos urbanos de Galicia. Los residuos producidos por las actividades relacionadas con la explotación de granito quedarían excluidos de la Ley, de acuerdo a lo expuesto en los puntos 4.2.b y 4.2.c.

Por otro lado, el R.D. 154/1998, de 28 de mayo (D.O.G. 107, 5.06.98), por el que se publica el Catálogo de Residuos de Galicia, el cual toma como base el Catálogo Europeo de Residuos (CER), establece 20 grupos de residuos, señalando entre éstos cuáles tienen carácter de peligrosos. De acuerdo con el CER, los residuos ocasionados por las actividades de extracción de granitos pertenecerían al grupo 01 (residuos de prospección, extracción, preparación y otros tratamientos de minerales y canteras), subgrupos 010102 (residuos de la extracción de minerales no metálicos) y 010406 (residuos de cortado y serrado de la piedra).

En otro orden de cosas, la puesta en marcha del Plan de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de Galicia 2004-2010 (CMA, 2005) plantea un interesante reto ambiental en el que se pretende reunir dos problemáticas: la propia del programa de sellado y clausura de vertederos de RSU¹, y por otro lado, la gestión de un residuo industrial. De ese modo, al amparo de la Instrucción Técnica ITR/01.0/04, que posibilita el uso de los serrines como material inerte, en el presente trabajo se estudia la viabilidad de su uso como barreras de impermeabilización y sellado.

¹ Residuos Sólidos Urbanos.

3 MOTIVACIÓN

En el PNIR¹ queda recogido que: “...hay razones ecológicas y económicas que aconsejan impulsar las investigaciones y ensayos necesarios para buscar nuevos usos a estos residuos, claro que siempre que sus materiales y componentes cumplan con las exigencias de las normas técnicas y den las mismas prestaciones que los materiales vírgenes o de primer uso. Es por esto que los programas de I+D+i de las Administraciones deben priorizar las ayudas a las iniciativas en esa dirección...” (2008-2015 I PNIR).

Teniendo en cuenta los aspectos legales, la categoría en la que se engloban los serrines de granito y las inquietudes generales en torno a la búsqueda de soluciones para las grandes cantidades de residuos producidas por el sector de la piedra natural, el presente trabajo de investigación adquiere gran interés desde diferentes enfoques:

- ◆ En la aplicación de una estrategia de valorización de residuos producto de una actividad minero/industrial, repercutiendo en la reducción de su volumen, los cuales tienen como principal destino final el vertido o depósito.
- ◆ En el uso de un residuo que se convierte en materia prima de otro proceso, estableciéndose una cadena de valor sostenible y respetuoso, con el medio ambiente.
- ◆ En su encaje con diversos planes y la legislación de la administración pública.
- ◆ En constituir un modelo de gestión de residuos adoptable por otras regiones (dentro de España o fuera de ella), con problemáticas similares.

3.1 LOS SERRINES DE GRANITO EN EL MARCO DE LA INGENIERÍA CIVIL

La caracterización geoquímica de los serrines de granito ha permitido concluir que, desde la perspectiva legal, el empleo de estos materiales en aplicaciones relacionadas con la ingeniería civil no implica riesgo alguno sobre la salud pública, y una vez reunidas las condiciones oportunas, tampoco han de suponerlo para el medio ambiente. Esto llevó a la inclusión de los serrines de granito en la categoría de residuos inertes según la Instrucción Técnica de Residuos ITR/01.0/04, de la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia. Dicha instrucción que, entre otras finalidades, tiene por objetivo adoptar una solución medioambientalmente correcta y avanzada para los residuos originados en las actividades de corte y elaboración de roca ornamental, contempla como destinos finales de los residuos, entre otros, su uso en depósitos geotécnicos y como materia prima secundaria. Esta instrucción abrió las puertas a determinados usos de los serrines de granito en el marco de la construcción y la ingeniería civil.

¹ Plan Nacional Integrado de Residuos.

La aplicabilidad de los finos del corte del granito como rellenos minerales (para hormigones y mezclas bituminosas), capas de sellado para la clausura de vertederos, terraplenes, etc., es sugerida en diversos trabajos de investigación, entre los cuales cabe destacar el *ICAR 101-1* (ICAR, 2000).

Desde el punto de vista de su uso en terraplenes, según la caracterización llevada a cabo, los serrines cumplirían con lo establecido en el artículo 330 (terraplenes) del pliego de Prescripción Técnicas Generales para la construcción de carreteras y puentes, PG-3, en cuanto a que, a pesar de presentar un índice plástico que encuadraría el material dentro de la categoría de marginales, el mismo pliego incluye y acepta como material de construcción este tipo de materiales a juicio del Director del Proyecto y/o las Obras. Tal y como recogen las especificaciones del artículo 330, la falta de experiencia con estos materiales, así como la imposibilidad de recoger en un pliego de prescripciones generales un mayor número de especificaciones, obliga a tomar ciertas precauciones a fin de paliar incertidumbres. Éstas pasan por el denominado estudio especial del material de categoría marginal, específico para cada aplicación.

El uso de serrines de granito en barreras de impermeabilización y/o sellado, ha sido evaluado a partir de la conductividad hidráulica estimada a partir de ensayos geotécnicos normalizados con valores comprendidos entre 10^{-7} y 10^{-9} m s⁻¹, en función del grado de compactación (Barrientos *et al.*, 2010). Este rango permite establecer la idoneidad de los serrines para este uso de acuerdo con el RD 1481/2001, cumpliendo con los requisitos exigidos para las capas de protección y sellado o recubrimiento de vertederos, tras una adecuada compactación.

El empleo de los serrines de granito pasa por el desarrollo de ensayos piloto en los que se prueben a escala real y en condiciones naturales el comportamiento del material. Las características de tales ensayos deben ser previamente estudiadas mediante modelos experimentales a pequeña escala, a partir de los cuales se establezcan las condiciones óptimas de puesta en obra y monitorización de los ensayos pilotos, avanzando en la línea última de aplicación en contextos reales.

3.2 LA IMPORTANCIA DE LOS MODELOS EXPERIMENTALES

Con el diseño de un experimento se planea alcanzar un resultado reuniendo toda la información pertinente al problema investigado. La selección de parámetros y elementos constitutivos del experimento, debe atender a una secuencia completa de pasos tomados de antemano, en tanto que condicionan la calidad de los datos obtenidos. La finalidad es asegurar resultados veraces con los que llevar a cabo análisis objetivos de los datos, hasta lograr alcanzar deducciones válidas con respecto al problema establecido.

Los diseños experimentales surgen de la necesidad de responder a preguntas como qué características se desea estudiar y qué factores influyen sobre ellas, o qué procedimiento de análisis proporcionarán resultados significativos.

El objetivo principal es conseguir la máxima cantidad de información referente al problema investigado. La simplicidad de los diseños y la eficiencia de la ejecución, son indicadores de la riqueza de la experimentación desarrollada, una riqueza medida en términos de esfuerzo económico y temporal.

Por su parte, los modelos de simulación numérica tienen como finalidad reproducir resultados experimentales y predecir comportamientos bajo determinadas situaciones ideales. El uso de este tipo de aplicaciones informáticas está muy extendido en el campo de la ingeniería civil en tanto que permiten reproducir ensayos a escala real, cuyas estructuras de gran envergadura requieren de elevadas inversiones económicas y largos periodos de tiempo para la ejecución de ensayos. Por ello, las simulaciones numéricas constituyen una alternativa de predicción de marcado interés.

Este tipo de modelos se nutren de datos experimentales para su calibración y la validación de sus resultados. La calidad y cantidad de estos datos establece el grado de fiabilidad de los modelos numéricos. Por tanto, la importancia de los diseños experimentales reside en la necesidad de generar datos que permitan analizar y explicar comportamientos reales, contribuyendo a su vez en la elaboración de modelos teóricos de predicción.

CAPÍTULO

2

OBJETIVOS

1 Objetivo General	15
2 Objetivos Particulares	15
3 Estructura de la Tesis	15
3.1 Columna para Análisis Hidrogeoquímico de Materiales Granulares	16
3.2 Columna con Sensores de Humedad y Succión	17
3.3 Tanque de Electrodo	17
3.4 Dispositivo <i>ES-2345472-B1</i>	18

1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del trabajo desarrollado es estudiar de forma experimental la viabilidad técnica del uso de los serrines de granito como material para barreras ingenieriles de impermeabilización y/o sellado en vertederos controlados.

Con ello se pretende verificar el comportamiento de los serrines en el contexto de obra civil real, a través de modelos experimentales a escala reducida que pongan en evidencia las propiedades geotécnicas y geoquímicas caracterizadas en detalle en los últimos años mediante técnicas, herramientas y procedimientos normalizados, de uso convencional en el campo de la ingeniería civil.

2 OBJETIVOS PARTICULARES

Los ensayos experimentales son metodológica e instrumentalmente elaborados en base a objetivos concretos. Cada uno de ellos aporta un enfoque específico del problema estudiado, contribuyendo a la evaluación del objetivo general planteado.

De forma individual o como combinación del análisis de varios ensayos, los objetivos particulares del presente trabajo se pueden recoger en los siguientes puntos:

- ◆ Análisis geoquímico de los serrines de granito como resultado de la interacción agua-suelo-aire: determinación de las propiedades fisicoquímicas del agua intersticial y lixiviada; reconocimiento de fases minerales de formación secundaria; análisis de la repercusión de la modificación de la fábrica original en las propiedades físicas de los serrines de granito.
- ◆ Estudio del comportamiento hidrodinámico de los serrines de granito bajo condiciones específicas de compactación e hidratación: reconocimiento de propiedades físicas iniciales; estimación de conductividades hidráulicas y capacidad de retención del material; isotropía del sistema en términos de respuesta hidráulica.
- ◆ Evaluación de la efectividad de los serrines de granito como barrera física para el control de lixiviados: eficacia de los métodos de compactación; trayectorias del frente de infiltración y direccionamiento inducido del flujo; estabilidad temporal del sistema.

3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo se centra en la búsqueda de respuestas relacionadas con el comportamiento hidráulico de los serrines de granito, que permitan esclarecer la viabilidad del uso de estos finos como material de obra para la construcción de barreras de

impermeabilización y/o sellado. Los objetivos planteados son abordados desde un enfoque experimental mediante modelos a pequeña y mediana escala en laboratorio.

Las particularidades de los distintos diseños experimentales, metodologías empleadas y análisis de los resultados obtenidos, son desarrollados en tres capítulos que constituyen el bloque central de la memoria: Capítulos 3, 4 y 5. Así mismo, en el Anexo II se acercan los dispositivos al lector, por medio de fotografías reales de los ensayo.

Otros aspectos relacionados con la calibración de determinados instrumentos o metodologías de muestreo, empleados durante el desarrollo de la investigación, han sido también objeto de estudio en profundidad. Este bloque de estudio es de vital importancia para la comprensión de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales. Sin embargo, el análisis de estas particularidades se desplaza de la línea principal de la investigación, con lo que se ha estimado oportuno recoger esta información en un capítulo adicional, anexo al documento principal (Anexo I).

A continuación se describen brevemente las características de los diseños experimentales empleados, así como el enfoque de la investigación en los ensayos llevados a cabo sobre cada uno de ellos.

3.1 COLUMNA PARA ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO DE MATERIALES GRANULARES

Se trata de una columna de ensayo para análisis unidimensional del comportamiento hidrodinámico y geoquímico de materiales granulares no consolidados, desarrollado en el *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources of Hannover, Alemania (BGR¹, Hannover)*. El dispositivo consta de una columna de PVC rígida de 7 cm de diámetro, con un volumen útil $\sim 2000 \text{ cm}^3$. Éste se encuentra equipado con herramientas de análisis no destructivo, tales como escáner de rayos-X y lámina geofísica para la medida de la conductividad eléctrica, evitando que el registro de datos interfiera en el comportamiento físico del sistema (técnicas de carácter no intrusivo).

En el Capítulo 3 se describe un ensayo hidratación-deshidratación desarrollado sobre una de estas columnas, empleando serrines de granito como material de estudio. En el mismo, los serrines fueron deshidratados e introducidos en el interior de la columna, para ser sometidos a un proceso de hidratación progresiva desde la base del dispositivo. El proceso de hidratación fue monitorizado en continuo (humedad y conductividad eléctrica), hasta alcanzar la condición de máxima saturación. Tras alcanzar este estado, se indujo su deshidratación parcial, empleando extractores de soluciones acuosas para suelos. Esto permitió analizar fisicoquímica y composicionalmente el agua intersticial de los serrines de granito. Además, el proceso de extracción permite evaluar la conductividad hidráulica del material en las condiciones de ensayo, a partir de los registros caudal-tiempo obtenidos de cada uno de los extractores.

¹ Siglas para el término alemán *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*.

Por último, se permitió que la columna se deshidratara de forma natural durante varios meses (evaporación inducida por la temperatura de laboratorio), periodo tras el cual se dismanteló el dispositivo para examinar los eventuales cambios desarrollados en la fábrica original del material.

3.2 COLUMNA CON SENSORES DE HUMEDAD Y SUCCIÓN

El dispositivo experimental consistió en un recipiente cilíndrico de metacrilato de 0.35 m de radio y un volumen útil de ensayo de 0.05 m^3 , equipado con sensores de humedad y succión (psicrómetros y sondas de capacitancia) ubicados a diferentes alturas. Los sensores permiten analizar la evolución del sistema suelo-agua del material alojado en la columna, en respuesta a la inundación controlada mediante un sistema de riego acoplado al dispositivo. Un sistema de colectores situados en la base del cilindro permitió almacenar, cuantificar y analizar los lixiviados procedentes de la percolación del material alojado en la columna.

Para el presente trabajo desarrollamos dos ensayos de hidratación en serrines de granito. Los resultados se presentan en el Capítulo 4. En ambos casos el material, parcialmente hidratado, fue compactado por capas, emplazándose simultáneamente los sensores de medida a diferentes cotas de interés. Los ensayos difieren entre sí tanto en las condiciones iniciales, producto del procedimiento de puesta en obra ejecutado y la humedad original del material, como en los tiempos de evaluación.

Los datos registrados permiten evaluar parámetros hidráulicos de interés en los serrines, tales como la conductividad hidráulica o la capacidad de campo, tanto de forma directa (a partir de los resultados observados), como de forma indirecta (empleando herramientas de simulación numérica).

Aspectos geoquímicos de interés como las propiedades fisicoquímicas de los lixiviados o la precipitación de nuevas fases minerales asociado a procesos de oxidación, completan esta parte del estudio.

3.3 TANQUE DE ELECTRODOS

Ubicado en el BGR de Hanover, el tanque de electrodos consiste en un cilindro de PVC con dimensiones análogas a las del cilindro de metacrilato descrito en el apartado anterior. Está equipado con un total de 80 electrodos que penetran lateralmente en el material ensayado desde la pared del tanque. Los electrodos se disponen en 5 anillos con 16 unidades cada uno, ubicados a diferentes alturas y configurados para realizar lecturas programables de la conductividad eléctrica del material alojado en el interior del dispositivo. La técnica permite evaluar el comportamiento del sistema suelo-agua con mínima interferencia en su dinámica natural (sólo los contornos se ven afectados). El diseño cuenta con un dispositivo de riego manual y canales para la recogida y posterior análisis de los lixiviados.

La hidratación de la columna se realizó desde su superficie de forma escalonada, hasta la aparición de los primeros lixiviados en los colectores inferiores del dispositivo experimental. Durante ese tiempo, se llevó a cabo un seguimiento de la conductividad eléctrica del material partir de la señal registrada por los electrodos, la cual se relaciona con la humedad del material. En el post-procesado de los datos registrados se obtiene la transformación de la señal eléctrica en grado de saturación, permitiendo evaluar el avance del frente de infiltración a través de la columna de serrines.

En la actualidad, la columna se encuentra sometida a deshidratación natural por evaporación a las condiciones de temperatura existentes en el laboratorio de emplazamiento (~25°C). En un futuro próximo, se procederá al desmantelamiento del dispositivo experimental para analizar distintos aspectos geoquímicos del sistema relacionados con el envejecimiento de los serrines de granito. En el momento del desmantelamiento, los serrines habrán permanecido alrededor de un año bajo las condiciones de evaporación impuestas.

3.4 DISPOSITIVO ES-2345472-B1

El dispositivo experimental "*Dispositivo para la simulación del comportamiento termo-hidro-mecánico de barreras de materiales finos para la impermeabilización y sellado de vertederos*" (ES-2345472-B1; Juncosa et al., 2011), consiste en un recinto de hormigón armado de planta cuadrada (abierto a techo y base), con elementos de soporte internos, sobre el cual se pueden verter y compactar materiales granulares, empleando para ello maquinaria de obra ligera. Cuenta con un sistema automatizado de riego que abastece unas boquillas nebulizadoras, a través de las cuales se suministra agua a la superficie del material de manera controlada. Su finalidad es simular condiciones de lluvia pseudo-reales. El emplazamiento de sensores de humedad en el material de ensayo tiene por objeto monitorizar la evolución del sistema suelo-agua. De ese modo, un sistema de colectores dispuestos en la parte inferior de la barrera permite recoger y analizar los lixiviados procedentes de la percolación del material estudiado.

El diseño de este dispositivo experimental fue enfocado al estudio de materiales finos (limo/arcillas) a determinadas condiciones de compactación, y bajo condiciones ambientales simuladas. Las dimensiones (~7 m³ de volumen útil), y robustez del recinto sobre el que se materializa el dispositivo, permiten emplear maquinaria ligera para la compactación durante los procesos de montaje, acercando las condiciones de ensayo a las de la escala real de aplicación en obra civil.

El dispositivo ES-2345472-B1, que es de uso general, es lo bastante versátil como para estudiar el comportamiento de distintas configuraciones en capas, ya sean estas barreras de impermeabilización (objetivo original), rellenos o terraplenes. De hecho, en el Capítulo 5 se ilustra un ejemplo de aplicación del mismo empleando una configuración tipo barrera capilar. En el mismo, una arena comercial, en condiciones de baja humedad, es compactada con cierta pendiente superficial sobre la cual se vierten y compactan tongadas de serrines de granitos hasta recuperar la horizontalidad superficial.

En el experimento ilustrado, una vez alcanzadas las condiciones prescritas para el ensayo, se llevaron a cabo dos ejemplos de aplicación. En primer lugar, el sistema fue configurado para el riego automático del modelo, intentando reproducir unas condiciones pluviométricas cercanas a las de un emplazamiento concreto (condiciones realistas), a partir de datos del registro histórico de lluvias de la región con mayor producción de serrines de granito (zona occidental de la provincia de Pontevedra). Tras este primer ejemplo, se llevó a cabo un ensayo con ciclos repetidos de hidratación/secado, en los cuales los procesos de deshidratación se desarrollaron tanto vía no forzada (evaporación natural), como forzada mediante la ventilación inducida con un flujo de aire desde la base del recinto.

Los ensayos realizados han puesto de manifiesto los puntos fuertes y débiles del diseño original del dispositivo, permitiendo su mejora para futuros ensayos. Desde el punto de vista de los resultados específicos de cada ensayo, adelantamos que ha destacado el buen funcionamiento de la configuración de barrera capilar desarrollada, empleando serrines de granito como capa de finos.

CAPÍTULO

3

ENSAYO DE HIDRATACIÓN, DESHIDRATACIÓN Y ENVEJECIMIENTO EN SERRINES DE GRANITO

1 Introducción	23
2 Instrumentación	24
2.1 Elementos de la Columna	24
2.2 Calibración de Equipos	25
3 Materiales y Métodos	27
3.1 Montaje del Ensayo	28
3.2 Monitorización y Procesamiento de Datos	29
4 Resultados	36
4.1 Fase de Hidratación	36
4.2 Fase de Deshidratación	39
4.3 Fase de Envejecimiento	58
5 Discusión de Resultados	63
5.1 Análisis Hidrogeoquímico	63
5.2 Análisis Hidrodinámico	64
5.3 Análisis Mineralógico	65

1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se evalúan los resultados obtenidos durante un ensayo llevado a cabo en el BGR de Hanover con serrines de granito. Desarrollado sobre un dispositivo de columna para el análisis unidimensional del comportamiento hidrodinámico y geoquímico en materiales granulares no consolidados (Redwan y Rammlmair, 2010), el dispositivo está diseñado sobre una columna de PVC rígida dotada con equipos de análisis no destructivos y no intrusivos (p.ej. escáner de rayos-X; lámina geofísica para medida de la conductividad eléctrica), evitando que el registro de datos interfiera en la dinámica natural del sistema.

La columna se rellenó con $\sim 2000 \text{ cm}^3$ de serrines de granito deshidratados. El material no fue compactado. La hidratación se realizó a través de aperturas situadas en la zona inferior de la columna, las cuales estaban conectadas a un depósito externo situado a mayor altura para establecer un gradiente hidráulico que permitió el avance del flujo de modo ascendente, durante el cual el agua se incorpora al material desplazando el aire de poro en su ascenso. El ensayo se desarrolló empleando agua destilada. La monitorización de la evolución de la hidratación se llevó a cabo mediante la interpretación de los datos de absorción de rayos-x registrados (Rammlmair *et al.*, 2001; Rammlmair *et al.*, 2006). Esta técnica permite determinar la porosidad y el grado de saturación del material, con una resolución espacial vertical de hasta $10 \mu\text{m}$.

La hidratación se realiza de forma escalonada, añadiendo en el material volúmenes prescritos de agua y realizando un seguimiento de la evolución del sistema agua-suelo. La incorporación de agua es acumulativa, es decir, el sistema es quasi-cerrado a excepción de la superficie superior de la columna, expuesta a procesos de evaporación natural. Durante las mediciones, se transforman los datos de conductividad eléctrica del material y el grado de saturación en valores de conductividad eléctrica del agua de poro, ofreciendo información cualitativa acerca de los procesos de disolución y el transporte que tienen lugar a lo largo de la columna.

Una vez alcanzada la máxima saturación en la columna, se llevó a cabo la extracción del agua intersticial de los serrines mediante herramientas para extracción de soluciones acuosas *Rhizon*. Tanto el agua de poro extraída como aquella que rebosó la columna tras la saturación del material, o la que quedó almacenada en el depósito inferior del dispositivo, fueron analizadas mediante *ICP-MS*¹, obteniéndose información cuantitativa de los procesos hidrogeoquímicos que tienen lugar en el sistema.

Finalmente, de forma previa al desmantelamiento, la columna quedó expuesta a procesos de deshidratación natural por evaporación en condiciones ambientales de laboratorio, durante un periodo de 5 meses. Transcurrido este tiempo, se procedió al desmantelamiento de la columna y se prepararon tres secciones pulidas para análisis mineralógico y textural mediante microscopía electrónica de barrido.

¹ Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

La exhaustiva variedad de datos obtenidos permite establecer tendencias composicionales en el agua que lava el material, enriquecer el conocimiento de los fenómenos relacionados con la hidratación de los serrines de granito y reconocer aspectos mineralógicos de gran interés.

El objetivo de estos ensayos es estudiar el comportamiento hidrogeoquímico e hidrodinámico de los serrines de granito al ser sometidos a ciclos de hidratación-deshidratación controlados y monitorizados, profundizando en el reconocimiento de nuevas fases minerales asociadas a procesos de disolución-precipitación, que modifican la fábrica original del material.

2 INSTRUMENTACIÓN

Los equipos empleados durante la realización del ensayo incluyen: i) los necesarios para la preparación del material; ii) los que conforman el diseño experimental de columna; iii) aquellos propios de las técnicas de laboratorio por medio de las cuales se evalúan los distintos parámetros analizados en el ensayo. Durante la preparación del material se emplean estufas de secado, cámaras de liofilización y maquinaria para la homogenización textural de materiales granulares no consolidados.

Los análisis realizados en el laboratorio incluyen la medida de la conductividad eléctrica del agua, pH, su análisis químico mediante la técnica ICP-MS, fluorescencia de rayos-X y el análisis mineralógico y textural sobre láminas pulidas de muestras de suelo mediante microscopía electrónica de barrido (*SEM-EDX*)¹.

2.1 ELEMENTOS DE LA COLUMNA

La columna experimental sobre la que se ha llevado a cabo el ensayo (Figura 3.1), se materializa sobre un tubo de PVC [4] de 60 cm de altura y 7 cm de diámetro interno [D], cuyo grosor de pared es 0.5 cm. El tubo se divide en dos secciones consistentes en una base de PVC masiva [B] de 10 cm de altura, con un espacio interno de morfología cónica [7], mientras que el resto del tubo [H], constituye la columna donde se sitúa el material a ensayar. Ambas secciones quedan separadas por una placa porosa [6], que actúa como nivel base del material granular y permite el avance libre y la homogénea distribución del agua. Dos aperturas [13] conectan el exterior con el espacio cónico [7], permitiendo tanto la entrada como el drenaje de agua en el sistema. La sección superior de la columna [H] lleva adosada a su pared interior una lámina geofísica [9] conectada a la herramienta *SIPLab*² [8], la cual está configurada para realizar mediciones puntuales de la resistividad eléctrica del material en 20 niveles distintos. Cada uno de estos niveles está dotado de cuatro electrodos alineados en serie [12], conectados a 80 cables incrustados en la malla geofísica [9].

¹ SEM: Scanning Electron Microscope; EDX: Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy.

² SIPLab: Spectral Induced Polarization, Radic Research, Berlin (www.radic-research.de)

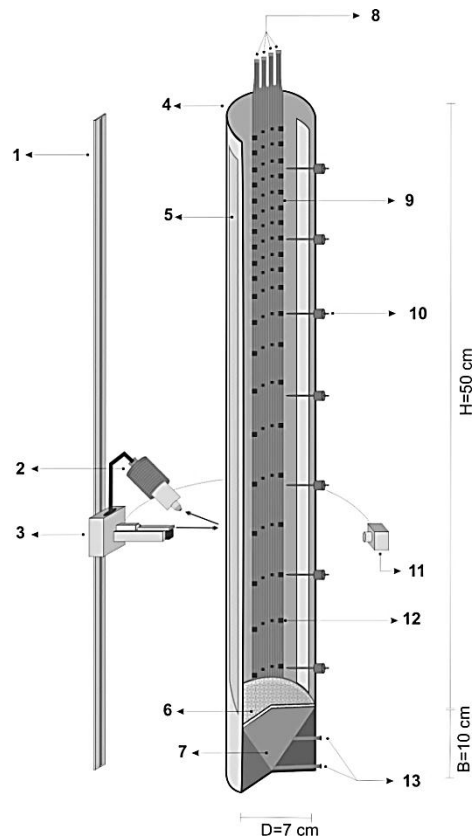


Figura 3.1. Columna para la monitorización simultánea del grado de saturación y la conductividad eléctrica en materiales granulares. [1] Soporte para el movimiento vertical del *GeoScanner ITRAX*; [2] Detector de señal; [3] Fuente de rayos-X; [4] Tubo de PVC; [5] Lámina de PVC transparente; [6] Placa porosa; [7] Depósito inferior de agua; [8] Conectores para *SIFLab*; [9] Lámina geofísica; [10] Puertos para Rhizon; [11] Cámara *ITRAX*; [12] Electrodo; [13] Tubos para hidratación/drenaje; [H] Altura de la columna; [B] Altura del depósito; [D] Diámetro interno de la columna.

Dos ventanas de 45 cm de altura por 2 cm de ancho [5] se abren sobre la pared de PVC en posiciones opuestas, selladas con una fina lámina de PVC de 50 μm grosor. Su función es permitir el paso del haz de rayos-X minimizando la absorción de la fuente [3]. El detector de intensidad [2] y la cámara [11] completan los elementos que componen el *Geoscanner ITRAX*¹, los cuales son exteriores a la columna y quedan dispuestos frente a las ventanas [5]. Aprovechando un soporte vertical [1] que actúa a su vez como rail, el escáner de rayos-X se traslada a lo largo de la columna realizando medidas con una resolución espacial máxima de hasta 10 μm .

Por último, sobre la pared del cilindro experimental se sitúan diversos puertos [10] para la inserción de muestreadores de agua Rhizon, a partir de los cuales se obtiene el agua de poro presente en el material para su posterior análisis.

2.2 CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

¹ *COX Analytical Systems AB, Sweden* (www.coxsys.se)

Los equipos empleados en el seguimiento del ensayo durante la fase de hidratación son el Geoscaner ITRAX, para realización de perfiles de absorción de rayos-X, y la lámina geofísica acoplada a SIPLab, un sistema electrónico para determinación de la respuesta eléctrica del medio. Tal y como ya se ha comentado, se trata de técnicas de muestreo no intrusivas y no destructivas, que se basan en la respuesta del material ante una excitación externa con una fuente de energía determinada. La señal es función, en ambos casos, de las propiedades intrínsecas del material analizado y de las características físicas del recinto que lo contiene. Por ello, antes de ejecutar el ensayo, fue preciso calibrar la respuesta de cada uno de los equipos del dispositivo de columna empleando materiales de referencia.

Los parámetros de medida empleados en el transcurso del ensayo coinciden con los propuestos por Redwan y Rammlmair (2010), quienes profundizan, además, en las especificaciones técnicas de ambos equipos.

2.2.1 LA HERRAMIENTA SIPLAB

El equipo empleado para el estudio de la conductividad eléctrica en la columna de ensayo es SIPLab, un sistema electrónico diseñado para la medida de resistividades en sedimentos y rocas, en el dominio de frecuencia compleja. El instrumento ha sido optimizado para la realización de medidas multielectródicas en laboratorio, repetibles y programables para diferentes intervalos de tiempo.

SIPLab se acopla a la columna de ensayo a través de una lámina geofísica con 20 niveles electródicos, cada uno de los cuales está, a su vez, constituido por 4 electrodos con una configuración tipo *Wenner*. Empleando agua de abastecimiento como material de referencia, se procede a la corrección del valor obtenido con SIPLab (σ_b) mediante la comparación con la conductividad eléctrica del agua (σ_w). La medida de la conductividad eléctrica del agua se realiza paralelamente mediante un conductímetro comercial, previamente calibrado en laboratorio mediante soluciones de referencia de conductividad adecuada. El conductímetro está programado para realizar la conversión de la conductividad medida a una temperatura determinada, a la correspondiente para la temperatura estándar de 25 °C (σ_w^{25}); no obstante, la temperatura ambiental en el laboratorio de ensayo era próxima a la estándar. Con ello se establece un factor de corrección para cada nivel electródico (K^n), que permite corregir los valores registrados durante el ensayo.

$$\sigma_w^{25} = \sigma_b K^n \quad \text{e.3.1.}$$

2.2.2 GEOSCANER ITRAX

El análisis de la variación del contenido en agua en la columna de ensayo se ha realizado empleando el GeoScanner ITRAX. Se trata de un escáner de rayos-X de desarrollo vertical, basado en un generador *Rich. Seifert & Co. ISODEBEYEFLEX 3003 HV-Generator*.

El escáner, que se instala sobre un soporte vertical, emite un haz policromático de rayos-X que atraviesa el material alojado en la columna. La señal es detectada al otro lado del dispositivo experimental por una cámara de detección de absorción de rayos-X, equipada con un filtro para el registro selectivo de la señal en la zona central del haz. Con ello se reduce la contribución de rayos-X secundarios en la imagen obtenida. El movimiento vertical simultáneo del haz y la cámara fueron ajustados para fijar la resolución espacial en 250 μm .

La imagen de rayos-X obtenida a partir de un haz policromático puede presentar distorsiones denominadas artefactos. Uno de los artefactos más comunes es el denominado "endurecimiento del haz", debido al filtrado selectivo de los rayos menos energéticos del mismo cuando este atraviesa materiales densos. En nuestro ensayo, este efecto es mínimo al tratarse de una muestra cilíndrica homogénea, por lo que el ángulo de incidencia es siempre ortogonal al haz (Heijs *et al.*, 1995). No obstante, es sabido que los cambios en el contenido de agua en los suelos causan variaciones del valor integral del haz mucho más relevantes que el efecto del endurecimiento (Bayer *et al.*, 2004).

La atenuación energética sufrida por el haz al atravesar una muestra, puede ser evaluada a través de un coeficiente de absorción (μ). Según la ley de Lamber-Beer (e.3.2), este coeficiente expresa la variación de la intensidad inicial del haz (I_0) respecto de la intensidad final (I), en función de las propiedades del medio y de la distancia N recorrida a través del mismo (Taud *et al.*, 2005):

$$\ln \frac{I_0}{I} = \mu N \quad \text{e.3.2.}$$

En nuestro caso, la máxima distancia recorrida por el haz a través del material de ensayo queda definida por el propio diámetro de la columna. Sin embargo, las finas láminas de PVC empleadas como ventanas para los rayos-X son susceptibles de deformarse, variando, por tanto, el espesor del material en algunos puntos. Este efecto puede ser corregido realizando medidas de calibración, rellenando la columna de agua. Las variaciones puntuales del valor de la absorción respecto de su valor medio, permiten establecer un factor de corrección del diámetro en cada punto de la columna.

Por otra parte, leves variaciones de posición e inclinación de la columna respecto al plano trazado por el haz, pueden generar variaciones en el valor de N . Estas variaciones, cuyo carácter es aleatorio, serán abordadas en el siguiente apartado a partir de una aplicación específica.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

La preparación de la muestra de serrines de granito y su disposición en la columna, marcan las condiciones iniciales del ensayo. Esto permite establecer un punto inicial teórico en la evolución del sistema, a partir del cual se llevarán a cabo los procesos de hidratación y

deshidratación controlados. El seguimiento y procesado de los datos obtenidos, completan los aspectos metodológicos del ensayo, y son particulares de cada uno de los fenómenos estudiados. Su análisis se desarrollará de acuerdo con el estadio en experimental, distinguiéndose entre: i) fase de hidratación; ii) fase de deshidratación; iii) fase de envejecimiento.

3.1 MONTAJE DEL ENSAYO

El proceso de montaje se realiza considerando diferentes aspectos que influyen de forma más o menos directa los resultados del ensayo. En primer lugar, garantizar la homogeneidad textural y composicional del material de ensayo a lo largo de la columna, lo cual requiere de un pretratamiento de secado/disgregación de los serrines de granito en bruto.

Los serrines de granito empleados fueron muestreados a la salida de los filtros prensa de una de las más importantes elaboradoras de piedra natural de la comarca de O Porriño (Pontevedra). En ese momento, su contenido en agua es, de acuerdo con Barrientos (2007), de ~36%. Para deshidratar el material y minimizar el efecto de la precipitación de sales por la evaporación del agua durante el secado en estufa (UNE-EN 103300-1993), el proceso se lleva a cabo vía liofilización. Una vez deshidratado, el material se desagregó mediante trituración y tamizado (tamiz 0.16 mm)¹, obteniendo un material completamente homogéneo.

Tras el preprocesado descrito, el material se vertió en el interior de la columna empleando un dispositivo automático para la mezcla de materiales granulares (*Sample Divider Type PK, Nr 2275, Retsch KG Germany*). Este equipo minimiza el sesgo del operador mediante un proceso de homogenización mecánica. De modo simultáneo, la columna es agitada, con el fin de minimizar los efectos de asentamiento en el material, el cual se compacta de forma natural por la acción de su propio peso.

El llenado finaliza con una columna de serrines de granito de ~45 cm de altura. Conocido el volumen del dispositivo experimental (previamente determinado a partir de la cantidad de agua que es capaz de albergar), se estiman las propiedades físicas básicas de la muestra. De forma teórica, estas propiedades representan las condiciones iniciales de ensayo (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Condiciones iniciales de ensayo. Propiedades físicas de la columna de serrines de granito.

h (cm)	M (kg)	ρ_d (g cm ⁻³)	e (cm ³ cm ⁻³)	ϕ (cm ³ cm ⁻³)	θ (cm ³ cm ⁻³)	S_w
45.2	2.24	1.33	1.40	0.58	0.00	0.00

* h , altura de la columna; M , masa de serrines; ρ_d , densidad seca; e , índice de huecos; ϕ , la porosidad; θ , contenido volumétrico en agua; S_w , grado de saturación.

¹ La curva granulométrica de los serrines de granito muestra que más del 95% de las partículas poseen un tamaño inferior a 0.16 mm (Barrientos *et al.*, 2010).

3.2 MONITORIZACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

3.2.1 FASE DE HIDRATACIÓN

El proceso de hidratación se realiza añadiendo en el sistema volúmenes definidos de agua. De forma acumulativa los serrines de granito van siendo humedecidos hasta alcanzar la condición de saturación. La incorporación de agua se realiza a través de aberturas localizadas en la zona inferior de la columna (Figura 3.1 [13]), las cuales están conectadas a un depósito externo situado a mayor altura. Con ello se garantiza un gradiente hidráulico suficiente para el avance del flujo de modo ascendente. En su ascenso, el agua reemplaza al aire en el espacio poroso.

Partiendo de la columna de serrines secos, la hidratación se ejecutó mediante 10 escalones en los que se suministró 100 cm^3 (1000 cm^3 en total). El primer escalón permitió rellenar el depósito inferior (Figura 3.1 [7]), por lo que tan solo el 70% del agua introducida alcanzó el material (70 cm^3). Para los dos últimos escalones se añaden cantidades inferiores de agua, con el fin de estudiar detalladamente, los procesos que tienen lugar en el material cuando su saturación está próxima. El proceso de hidratación se da por concluido cuando se observa la salida de agua por el extremo opuesto de la fuente de hidratación, que es la zona superior de la columna de serrines (rebose).

En cada uno de los escalones, la columna es auscultada con el fin de observar la distribución del agua y los procesos de imbibición propios de los materiales finos. Los muestreos se llevan a cabo tras cada escalón de hidratación y consisten en: seguimiento de la evolución del contenido volumétrico en agua, a través de los datos de absorción de rayos-X; y determinación de la conductividad eléctrica del material a lo largo de la columna. Mientras que las mediciones radiológicas permiten establecer perfiles de humedad (con una resolución de espaciado vertical fijado en $250 \mu\text{m}$), la medida de la conductividad eléctrica está limitada a los 20 niveles electródicos verticales prescritos por la lámina geofísica.

◆ CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

El procesado de datos eléctricos implica invertir el registro de resistividades eléctricas para obtener un valor de conductividad propio de cada uno de los niveles electródicos de la lámina geofísica, el cual es corregido aplicando el factor determinado en cada nivel (e.3.1).

◆ CONTENIDO VOLUMÉTRICO EN AGUA

El análisis de la distribución del contenido volumétrico en agua (θ) se obtiene a partir de los datos de absorción de rayos-X, mediante el conocimiento de los perfiles de absorción del material seco (μ_d), saturado (μ_s), y la porosidad del medio (ϕ), mediante la siguiente expresión (Bayer *et al.*, 2004):

$$\theta_i = \left(\frac{\mu - \mu_d}{\mu_s - \mu_d} \right)_i \phi_i ; \forall (i \in [0, h]) \quad \text{e.3.3.}$$

En la ecuación anterior (e.3.3) μ representa la absorción determinada en cada punto del muestreo y h la altura máxima de la columna. Para determinar el valor de la porosidad en cada punto, se evalúa el cociente de absorción $\frac{\mu - \mu_d}{\mu_s - \mu_d}$, despejando $\mu = \mu_s$ (escalón final del proceso de hidratación). Sustituyendo en el numerador las diferencias $\mu_s - \mu_d$ puntuales (i) a lo largo de la columna y en el denominador la diferencia promedio de tales coeficientes de absorción, se calcula θ_i respecto al valor teórico de la porosidad ($\phi_{media} \sim 0.58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). El cociente entre ambas variables determina el grado de saturación. En estado saturado se asume que ambas variables son iguales, lo cual permite conocer las variaciones locales en la porosidad de la columna a partir del proceso descrito. En nuestro caso, la saturación máxima alcanzada en el ensayo fue ~ 0.91 ; a pesar de ello, la relación entre las diferencias locales y globales de absorción definidas por el cociente de absorción, permiten estimar de forma aproximada el perfil de distribución de la porosidad en la columna de serrines.

Tal y como se indicó en el apartado anterior, los datos deben ser corregidos debido a los efectos aleatorios de la variación en la posición de la columna respecto de la fuente energética fija. Para ello, se emplea una aplicación programada en *MatLab* (*XRA_Adjust.mat*), que permite estimar la desviación sufrida por el valor medido respecto al teórico, en términos de contenido volumétrico en agua. La aplicación genera variaciones aleatorias de la pendiente de la columna (balanceos respecto al eje vertical), y del diámetro de la misma (por desplazamientos horizontales), devolviendo los valores que mejor ajustan los datos experimentales a los teóricos.

3.2.2 FASE DE DESHIDRATACIÓN

Al finalizar el proceso de hidratación de la columna, el material queda inundado en superficie. Con la finalidad de determinar el momento en el cual el sistema alcanza condiciones estacionarias, se realizan varias mediciones de absorción de rayos-X sobre la columna inundada. Transcurridos 2 días desde el momento en el que se constata el rebose superficial de la columna, el perfil de rayos-X mostraba alta uniformidad, lo cual dio pie a iniciar la segunda fase del ensayo: la deshidratación de los serrines.

La deshidratación se lleva a cabo de modo forzado. El agua intersticial es extraída mediante muestreadores Rhizon insertados en los serrines de granito a través de puertos especiales localizados en la pared de la columna de ensayo (Figura 3.1 [10]).

Los Rhizon son extractores de solución acuosa diseñados para la extracción de fluidos intersticiales en materiales porosos (Di Bonito, 2005; Seeberg-Elverfeldt *et al.*, 2005; Dickens *et al.*, 2007). La zona que se encuentra en contacto con el medio a muestrear consta de un polímero hidrófilo y poroso (Regalado *et al.*, 2005), conformando un entramado de tubos capilares cuyo diámetro nominal medio es $\sim 0.2 \text{ }\mu\text{m}$. Ello permite que el agua extraída esté

filtrada y lista para análisis químico. Los Rhizon poseen longitudes que oscilan entre 5 y 10 cm, según el modelo empleado, y un diámetro externo de 2.5 o 4.5 mm (Macro-Rhizon). La membrana aloja en su interior un filamento de acero o fibra de vidrio a modo de esqueleto, el cual aporta rigidez en vista a su inserción en el medio a muestrear. El conjunto alambre-membrana enlaza con un tubo de PVC de diámetro similar, el cual actúa como canal para la salida del agua hacia el exterior.

En la columna se insertaron 7 Rhizon de 5 cm de longitud a diferentes alturas. El agua de poro fue extraída con jeringas de 10 cm³, de manera simultánea en todos los niveles. En la Figura 3.2 se ilustran los distintos elementos que intervienen en el proceso de extracción mediante jeringa. El elemento de cierre giratorio tipo “luer-lock” [2] permite aislar el interior del tubo, posibilitando la extracción por succión establecida por extensión y anclaje [4] de la jeringa.

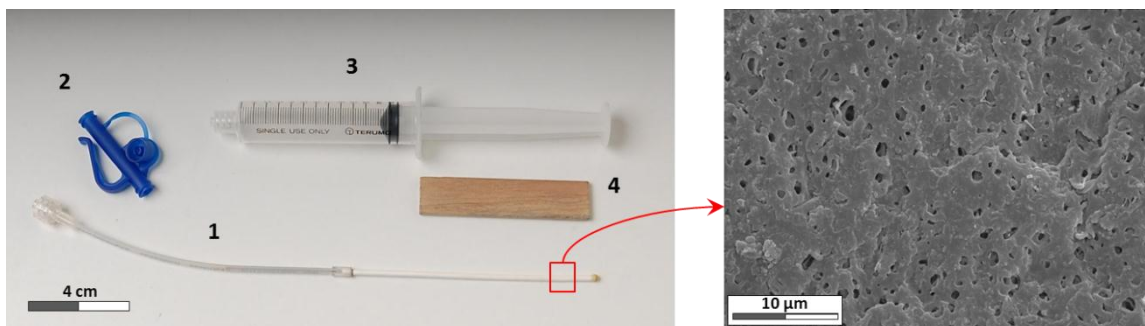


Figura 3.2. (A) Elementos de un Rhizon. [1] Rhizon; [2] Conector tipo “luer-lock”; [3] Jeringa; [4] Anclaje para succión. (B) Detalle del aspecto de la membrana porosa hidrófila (Imagen SEM).

Durante la deshidratación de la columna, el proceso de extracción se repitió en 5 ocasiones, registrándose en cada una de ellas el llenado de las distintas jeringas. La extracción permitió rebajar el S_w medio de la columna de ~ 0.91 a ~ 0.63 . Los datos obtenidos durante la fase de deshidratación mediante Rhizon son de dos tipos: geoquímicos (mediante análisis de las soluciones acuosas), e hidrodinámicos (a partir del control de la velocidad de llenado de las distintas jeringas).

3.2.2.1 APLICACIÓN GEOQUÍMICA DE LA EXTRACCIÓN CON RHIZON

El agua extraída del sistema incluye la alojada en los poros; la de rebose en la zona superior de la columna, tras la saturación del material al final de la fase de hidratación del ensayo; y la alojada en el depósito de la base del dispositivo experimental.

Cada una de las muestras de agua ha sido analizada fisicoquímica y composicionalmente. Además, la conductividad eléctrica y el pH fueron determinados en laboratorio mediante sondas comerciales calibradas con disoluciones patrón. Los constituyentes mayoritarios y traza de cada muestra fueron determinados mediante ICP-MS.

La última extracción no aportó suficiente cantidad de agua como para ser correctamente analizada, con lo que sólo se tuvo en cuenta a efectos del cálculo del balance de volumen de agua extraído.

3.2.2.2 APLICACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA EXTRACCIÓN CON RHIZON

Los dispositivos Rhizon poseen dimensiones y morfologías equivalentes a las de un pozo entubado con rejilla, a pequeña escala. Su funcionamiento se basa en la respuesta hidráulica del material poroso en el que es insertado cuando éste es sometido a un gradiente de presiones negativas (succión). Dicho gradiente es impuesto externamente mediante bombas o jeringas acopladas al Rhizon. Cuando se usa una bomba, es posible, teóricamente, mantener una succión constante; sin embargo, en el caso de las jeringas, la succión es necesariamente variable y limitada por su tamaño físico. Por lo tanto, la extracción mediante una bomba sería análoga a la de un ensayo hidráulico a caudal constante, mientras que la utilización de una jeringa se correspondería con aquellos de caudal variable.

Con el fin de obtener información relativa a la hidrodinámica del material de ensayo, hemos planteado el estudio a través de analogías funcionales con ensayos realizados de forma rutinaria en hidrogeología. La similitud conceptual entre el sistema conformado por el par Rhizon/serrines y el pozo/acuífero avala esta aproximación.

Con carácter general, los ensayos hidrodinámicos (p.ej. ensayos bombeo), permiten conocer características hidráulicas de los acuíferos, tales como su conductividad hidráulica, transmisividad o el coeficiente de almacenamiento. Entre las técnicas empleadas para la estimación de la conductividad hidráulica pueden destacarse, los determinados ensayos de nivel (piezométrico) constante y los de nivel variable. En el primer caso, la conductividad hidráulica se determina a partir de la inyección o extracción de un caudal con el que se controla el nivel piezométrico dentro de un sondeo de longitud y diámetro conocidos. En el segundo caso, se bombea a caudal constante y se evalúa la variación de nivel con el tiempo. Del mismo modo, el ensayo puede ser analizado indirectamente, midiéndose, tras el cese del bombeo, la evolución temporal del nivel en su tendencia natural a recuperar su estado inicial.

Partiendo de estas aproximaciones, el estudio del sistema Rhizon/suelo se aborda con ecuaciones análogas para las que es necesario definir ciertos parámetros de interés, los cuales son descritos a continuación.

◆ RADIO DE INFLUENCIA MÁXIMO

La extracción del agua de los poros se verificó mediante la succión impuesta sobre la membrana del Rhizon, previamente insertada y en contacto con el material a ensayar. Los suelos no saturados presentan una presión de poro negativa, la cual es función del grado de saturación y sus características intrínsecas (porosidad, tamaño de grano, tortuosidad, etc.). El dispositivo Rhizon resultará eficaz como extractor del agua de poro en suelos mientras la presión de poro que presenta el medio muestreado sea inferior, en términos absolutos, a la

ejercida por el elemento succionador acoplado al Rhizon (jeringa). De acuerdo con Di Bonito (2005), suponiendo un buen contacto membrana-suelo, el agua de un medio poroso podrá ser extraída empleando muestreadores Rhizon, mientras la conductividad hidráulica que presente el medio sea mayor a 10^{-8} m s^{-1} .

El volumen de influencia del Rhizon durante el proceso de extracción es un concepto que hace referencia al espacio del medio poroso que contribuye con agua de sus poros durante la extracción. Sus dimensiones están dadas por la presión capilar del medio, la succión aplicada, el diámetro del extractor y la porosidad del medio. La ecuación e.3.4 describe teóricamente el radio de influencia máximo (r_m) alrededor de una extracción puntual, de acuerdo con la hipótesis de flujo estacionario en un medio infinito (Warrick y Amoozegar-Fard, 1977):

$$r_m = \sqrt{\left(\frac{q}{\pi K_s}\right) \cdot 10^{(-\alpha h)}} \quad \text{e.3.4.}$$

En esta ecuación, q representa el flujo extraído ($\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$), K_s la conductividad hidráulica saturada (cm s^{-1}) y h la carga hidráulica (kPa), a una distancia r_m . Por su parte, α es un parámetro de ajuste particular para cada tipo de suelo con unidades de kPa^{-1} (Muallem, 1976; Bresler, 1978; Van Genuchten, 1980; Morrison y Szecsody, 1985).

A partir de esta expresión, Morrison y Szecsody (1985) proponen una ecuación que permite calcular el radio de influencia máximo en términos de conductividad hidráulica no saturada:

$$r_m = \sqrt{\frac{4r_0}{\alpha} e^{\left(\frac{\alpha r_0}{2}\right)} (1 - e^{\alpha \Delta h})} \quad \text{e.3.5.}$$

En esta expresión, r_0 representa el radio de la membrana del Rhizon en contacto con el material (radio externo de la membrana) y Δh la diferencia de succión inducida en los poros del material muestreado. Por su parte, el resto de parámetros coincide con los presentados para la ecuación e.3.4.

Otra aproximación (Seeberg-Elverfeldt *et al.*, 2005), de carácter geométrico, permite determinar el radio de influencia del Rhizon en función del radio potencial del cilindro de suelo influenciado por la extracción:

$$r_m = \sqrt{\frac{V_w}{\phi l \pi}} \quad \text{e.3.6.}$$

V_w representa el volumen de agua extraído (cm^3), ϕ la porosidad del material y l la longitud de la membrana porosa (cm). Esta aproximación no tiene en cuenta el efecto de la succión que

presenta el suelo en el momento de la extracción y, por lo tanto, sólo se aplica a medios saturados.

◆ ENSAYOS DE BOMBEO A NIVEL VARIABLE

En hidrogeología, los ensayos de bombeo a nivel variable son frecuentemente empleados para la determinación de la conductividad hidráulica (Custodio y Llamas, 1983; NAVFAC, 1986; Chirlin, 1989; Campbell *et al.*, 1990; Hyder y Butler, 1995). Esta metodología de ensayo es análoga a la ejecución secuencial de extracciones de agua mediante los muestreadores Rhizon.

Para la interpretación de ensayos de bombeo a nivel variable existen diferentes aproximaciones. Entre las más conocidas se encuentran los métodos de Hvorslev, usado para determinaciones en acuíferos libres (Hvorslev, 1951), y el de Cooper-Bredehoeft-Papadopoulos para acuíferos confinados (Cooper *et al.*, 1967). Cuando se trata de pozos de pequeño diámetro, los métodos de Lefranc o el de Gilg-Gavar, dan buenos resultados en materiales de baja conductividad hidráulica (Custodio y Llamas, 1983).

La columna experimental estudiada en nuestro trabajo está rellena de un material granular tipo limo, con baja conductividad hidráulica y en condiciones no confinadas. Por lo tanto, los métodos de Gilg-Gavard y Hvorslev proporcionan un marco teórico adecuado para su interpretación.

De acuerdo con el método Hvorslev, al inicio del ensayo se fuerza el ascenso del nivel de la columna de agua respecto de las condiciones estacionarias, midiéndose la recuperación en función del tiempo (transitorio/estacionario). En el caso de un acuífero, su conductividad hidráulica (K), puede ser calculada a partir de la siguiente expresión:

$$K = \frac{r_t \ln\left(\frac{L}{r_f}\right)}{2Lt_{37}} \quad \text{e.3.7.}$$

en la que r_t representa el radio de la entubación, L es la longitud del cilindro drenante, r_f el radio de la zona filtrante y t_{37} el tiempo en el que aún perdura el 37% del ascenso instantáneo inicial. Cuando la perforación presenta una relación longitud-diámetro superior a 8, el valor de la conductividad hidráulica puede ser calculado a partir de, entre otras, la siguiente expresión (Cedergren, 1967):

$$K = \frac{A}{F(t_1 - t_2)} \cdot \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad \text{e.3.8.}$$

donde h_1 y h_2 representan los niveles para los tiempos t_1 y t_2 , respectivamente; A es la sección perpendicular al pozo, la cual es aproximada a la superficie de un círculo; y F un factor de forma dependiente del tamaño y forma del área de infiltración de acuerdo con la expresión:

$$F = \frac{2\pi L}{\ln(L/r_t)} \quad \text{e.3.9.}$$

En nuestro caso, la relación longitud-diámetro de la membrana del Rhizon es ~ 25 , por lo que sería aceptable el empleo de la aproximación propuesta por Cedergren (1967) para el cálculo de la conductividad hidráulica.

Por otro lado, el cálculo de K de acuerdo con el método de Gilg-Gavard, en su variante de nivel variable¹, puede realizarse empleando la siguiente expresión:

$$K = \frac{1.308d^2}{Ah_m} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad \text{e.3.10.}$$

Es importante hacer notar que, las unidades de la ecuación e.3.10, están prescritas en la formulación planteada. De ese modo, K posee unidades de cm s^{-1} , d representa el diámetro de la zona filtrante (m), Δh la variación del nivel del agua (m) en el intervalo de tiempo Δt (min), h_m el valor medio del nivel de agua (m) para el intervalo de tiempo considerado, y A un factor de forma que es función de la longitud de la zona filtrante de acuerdo con las siguientes restricciones:

* si $L > 6$, $A = (1.032L + 30d)$;

* si $L \leq 6$, $A = (1.032L + 30d) \cdot (-0.014L^2 + 0.178L + 0.481)$

Consecuentemente, conocidas las características morfológicas de los Rhizon, así como las propiedades físicas de los serrines de granito alojados en la columna de ensayo, se precisa únicamente de la observación del caudal de llenado en cada extractor para obtener el valor de la conductividad hidráulica del medio en cada instante.

3.2.3 FASE DE ENVEJECIMIENTO

La última fase del ensayo consiste en permitir la deshidratación natural (no forzada) de la columna de serrines de granito por evaporación desde la superficie libre. La descripción y el análisis de las variaciones observadas en la fábrica original del material, completaron el ensayo.

El estudio de la fábrica del material se llevó a cabo transcurridos 5 meses desde la finalización de la deshidratación inducida mediante extracción con Rhizon. Durante este tiempo, los serrines alojados en el interior del dispositivo de ensayo quedaron expuestos a las condiciones de laboratorio.

¹ El método Gilg-Gavard se emplea en ensayos de recuperación a nivel constante o variable, contando cada una de las variantes con su correspondiente formulación (Custodio y Llamas, 1983).

Para llevar a cabo esta parte del estudio, la columna fue desmantelada y los serrines extraídos en una sola pieza. El cilindro de serrines fue dividido en dos secciones longitudinales. Sobre una de ellas se llevó a cabo un análisis composicional y determinaciones de humedad, mientras que de la otra se extrajeron tres muestras de suelo (a muro, centro y techo de la columna), acondicionadas para la fabricación de láminas pulidas para análisis morfológico y estructural mediante microscopía electrónica.

El análisis composicional de la sección se realizó con fluorescencia de rayos-X (Innov-X Systems). Por su parte, las láminas pulidas se examinaron combinando las técnicas de microscopía electrónica de barrido con la espectrometría de dispersión de energía (SEM-EDX).

4 RESULTADOS

El ensayo desarrollado ha permitido reunir una gran cantidad de datos de diversa naturaleza. El análisis de los resultados se aborda desde la evaluación discreta de cada una de las fases del ensayo.

4.1 FASE DE HIDRATACIÓN

Los cambios en la conductividad eléctrica y el avance del frente de saturación, medido como contenido volumétrico en agua y transformado a grado de saturación a partir de la porosidad en cada punto de muestreo, son los dos parámetros registrados en la columna durante la fase de hidratación. Las medidas se realizaron tras añadir cantidades prescritas de agua que, de modo acumulativo, fueron saturando la columna desde su zona inferior. En cada etapa de hidratación se llevaron a cabo medidas reiteradas de ambos parámetros, lo cual permitió observar el comportamiento de los serrines respecto de la progresiva reducción del gradiente de succión, producto de las diferencias locales del grado de saturación (Van Genuchten, 1980).

En la Figura 3.3 se muestra, de forma acoplada, los dos parámetros estudiados al final de cada etapa de hidratación. Cabe destacar que las características presentes al final de cada etapa de hidratación son las iniciales de la siguiente.

El grado de saturación teórico medio alcanzado en la columna es ~ 0.91 . Este dato queda bien reflejado en la distribución regular del agua en todo el dominio del perfil de saturación en el estadio correspondiente a 891 cm^3 . El ensayo carece de medidas en detalle de la consolidación del material, de modo que el grado de saturación final alcanzado por la columna, puede estar influenciado por una sobreestimación de la porosidad (valor inicial medio $0.58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Los perfiles de los escalones de 570 y 670 cm^3 , muestran grados de saturación localmente bajos en distintos puntos, homogenizados en el escalón 770 cm^3 . Este efecto podría explicarse por un proceso de consolidación en esas zonas, más susceptibles al asentamiento por presentar una porosidad inicial elevada, lo cual se ve reflejado en un grado de saturación menor. Al no observarse un descenso de la altura total de la columna de material, se asume que el efecto de la consolidación tiene un carácter local.

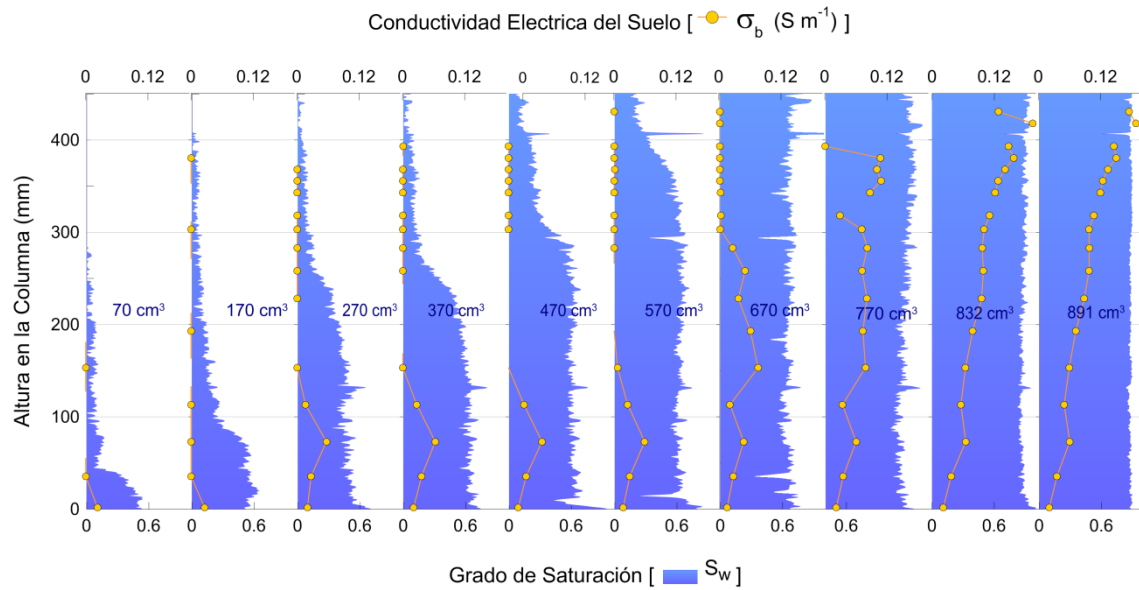


Figura 3.3. Evolución del grado de saturación y la conductividad eléctrica de los serrines de granito durante la fase de hidratación. Cada perfil representa el estado final que alcanza la columna para cada etapa de hidratación. Las etiquetas que acompañan cada perfil representan el volumen acumulado (cm^3) de agua aportada.

En los perfiles se aprecia un patrón de comportamiento análogo entre la conductividad eléctrica y el grado de saturación. Los electrodos, situados en el perímetro de la columna, comenzaron a registrar datos cuando fueron alcanzados por el frente de hidratación. En la sección superior de los perfiles de 470, 570 y 670 cm^3 , no se observó una respuesta eléctrica en los serrines, a pesar de que el grado de saturación es similar al de la zona inferior. Esto puede ser el resultado del avance diferencial del frente de saturación más rápido en la zona central de la columna que en sus bordes. Esto daría lugar a un patrón de flujo preferencial (*fingering*), propio de materiales de grano fino no saturados (Glass y Yarrington, 1996). En ellos, el flujo está condicionado por fuerzas capilares dependientes de factores propios del material, tales como la permeabilidad, su estructura porosa, la constrictividad (relación entre la forma del poro y su cuello conector con el poro vecino), la hidrofilia/hidrofobia que presenta, o la tensión superficial entre grano y agua (Van Brakel y Heertjes, 1974; Akin *et al.*, 2000; Schembre y Kavscek, 2003).

A partir del perfil de 270 cm^3 , se observa un pico en la conductividad eléctrica del material a una altura de 70 mm, el cual permanece constante durante la fase de hidratación del ensayo. Esta anomalía podría estar vinculada con una mayor proporción de granulometría arcillosa en esa posición. Las arcillas llevan asociados incrementos en la conductividad eléctrica, debido principalmente a la formación de gradientes locales de concentración iónica en la zona de constricción de los poros del material, producto del efecto filtro-membrana por obturación de los canales de flujo a través del medio poroso (Lima y Niwas, 2000). No obstante, los serrines de granito presentan partículas conductoras como granalla de acero o minerales

ferromagnesianos, por lo que esta interpretación debe ser sometida a un análisis químico del material en profundidad.

Es interesante realizar algunas observaciones de detalle en los perfiles 270 y 670 cm³ (Figura 3.4, Figura 3.5). En ambos casos, el periodo entre la primera y la última medida es mayor que en el resto de los perfiles. Esto permite observar la evolución del sistema hacia un estado de equilibrio interno de presiones, reflejado por transferencias de agua desde las zonas más húmedas hacia las más secas (baja y alta succión, respectivamente).

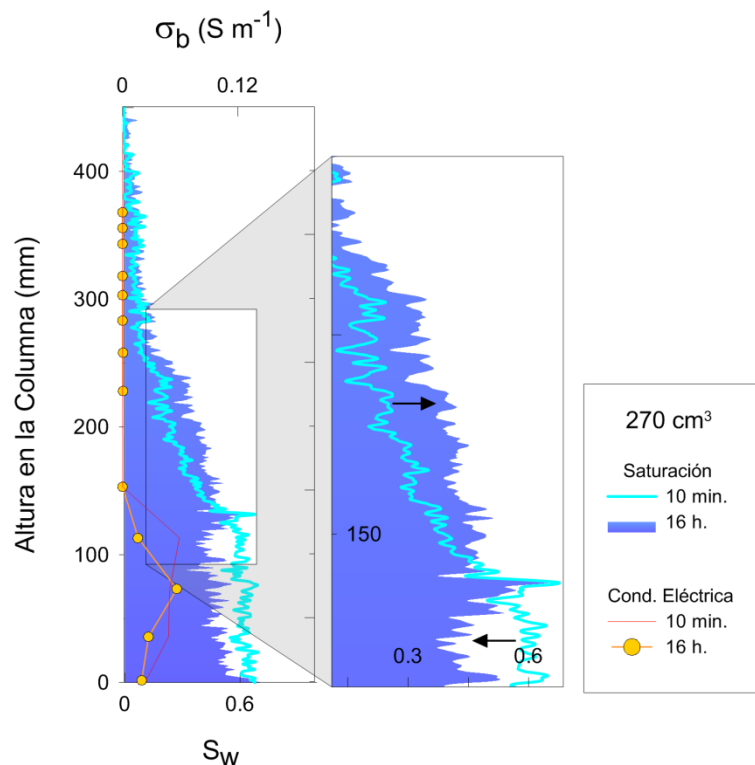


Figura 3.4. Evolución temporal de la etapa de 270 cm³. Representación de la saturación y la conductividad eléctrica del suelo. A la derecha, magnificación del perfil asociado a la franja capilar.

En la Figura 3.4 se representa la conductividad eléctrica y el grado de saturación correspondiente a la etapa de 270 cm³, comparándose los perfiles correspondientes a los 10 minutos y 16 horas desde el aporte del agua. Tanto la respuesta eléctrica como la distribución de agua sufren un reajuste en el intervalo de tiempo considerado. Ampliando la zona central del perfil de saturación se observa con mayor detalle el fenómeno de reajuste del sistema como resultado de la transferencia de agua desde las zonas más húmedas hacia las más secas.

Por su parte, en la Figura 3.5 se muestra el mismo efecto en tres momentos consecutivos. Dado que el grado de saturación no varía demasiado en la sección inferior de la columna, las diferencias de conductividad observadas están asociadas al transporte de masa (solutos), ya sea por advección o difusión, como resultado del fenómeno de hidratación. Este fenómeno induce una disminución de la concentración en la parte baja de la columna.

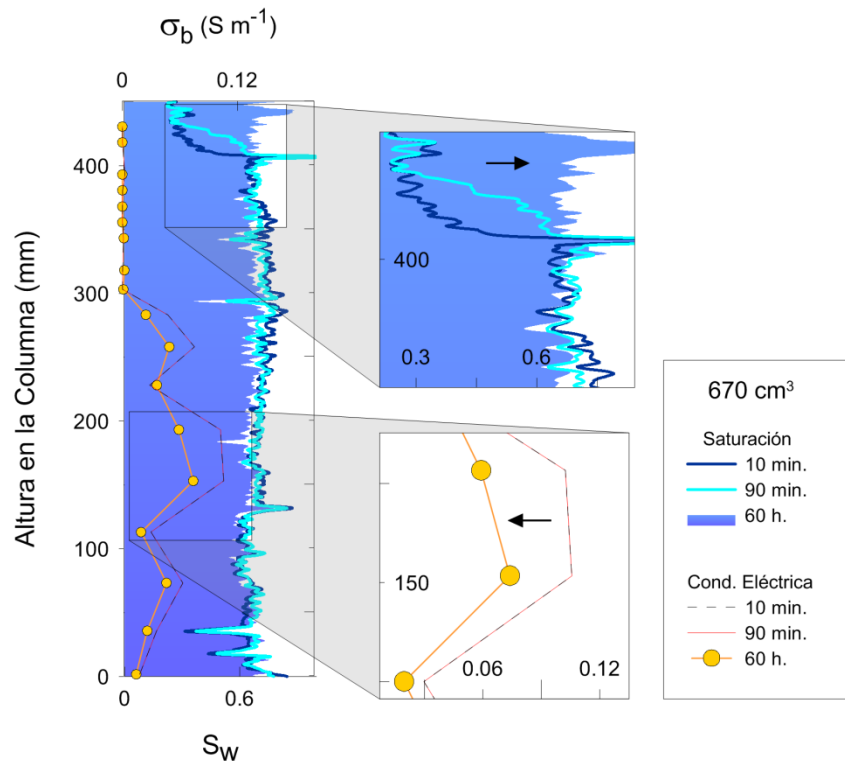


Figura 3.5. Evolución temporal del escalón 670 cm³. Representación de la saturación y la conductividad eléctrica del suelo. A la derecha, magnificación de la evolución de la saturación, en la franja capilar, y la conductividad eléctrica, en zona intermedia.

En lo referente al fenómeno de la capilaridad, éste se ve reflejado en la sección superior de la columna y no en la inferior. Tal efecto está relacionado con la succión inicial de cada punto de la columna, siendo mayor en las zonas más deshidratadas (sección superior). La distribución del grado de saturación inicial del perfil, es el representado por el escalón de 570 cm³ (Figura 3.3). En este caso, el largo periodo de tiempo transcurrido entre medidas sugiere un efecto de homogenización en el grado de saturación en la columna mayor que en el caso anterior (escalón de 270 cm³, Figura 3.4).

Por último, los perfiles posteriores al de 770 cm³ no muestran con claridad el efecto de las fuerzas capilares, y sí un avance regular del frente de saturación a lo largo de la columna. Esto puede ser explicado de nuevo a través de un equilibrio de presiones, aunque en esta ocasión condicionada por la diferencia de alturas entre columna y depósito de abastecimiento. Se puede interpretar con ello que el grado de saturación alcanzado en el escalón de 770 cm³ ($S_w \sim 0.75$), representa aquel por encima del cual el material pierde su poder de retención, es decir, la capacidad de campo de los serrines de granito a las condiciones de ensayo.

4.2 FASE DE DESHIDRATACIÓN

Los resultados de la fase de deshidratación se tratarán a partir de los enfoques geoquímico e hidrodinámico. En el primero recogemos los aspectos fisicoquímicos y composicionales del

agua extraída, la cual presenta unas características determinadas por su relación con el material (agua de poro o agua libre¹ a techo y muro de la columna).

En relación con el comportamiento hidrodinámico, evaluaremos la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los serrines de granito, de acuerdo con las condiciones de ensayo planteadas.

4.2.1 ASPECTOS GEOQUÍMICOS DEL ENSAYO

El análisis fisicoquímico y composicional del agua del sistema aporta información acerca de los procesos de interacción fluido/serrines y de los fenómenos de transporte de masa, los cuales resultan interesantes a la hora de interpretar las modificaciones de la fábrica original del material.

De entre los parámetros fisicoquímicos tienen gran interés el pH y la conductividad eléctrica. Ambos pueden ser medidos con facilidad en el laboratorio a partir del agua extraída de la columna. Además, en el caso de la conductividad eléctrica del agua, su valor puede ser inferido de forma indirecta a partir de la conductividad eléctrica del suelo y su contenido en agua.

Por otro lado, el análisis del agua extraída permite describir tendencias temporales y espaciales en ciertos constituyentes así como su correlación con otras variables de interés del sistema (conductividad hidráulica, pH).

4.2.1.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

Se analizó la composición química en tres tipos de agua de la columna experimental: agua intersticial, agua de rebose y agua de base, en función de su ubicación en la columna.

El agua intersticial representa el agua de poro extraída con los Rhizon a diferentes alturas en la columna de ensayo, empleándose las siglas *E1*, *E2*, *E3*, *E4* y *E5*, para denotar la secuencia de extracción (1 a 5, respectivamente).

El agua de rebose es aquella que, tras atravesar la columna rebosa por su zona superior. Ésta aparece durante el último escalón de carga y es filtrada con Rhizon para liberarla de sólidos en suspensión.

Finalmente, con el término “agua de base” designamos el agua recogida del depósito inferior de la columna. Su composición, renovada en cada escalón de hidratación con el agua destilada suministrada a la columna, está influenciada por los reajustes fisicoquímicos experimentados por los serrines en estado saturado, enriquecida con elementos en disolución de la zona superior por fenómenos de retrodifusión.

Los datos de pH y conductividad eléctrica para cada uno de los tipos de agua señalados, se representan en la Figura 3.6. En la misma se muestran sólo los resultados de las cuatro

¹ Agua libre: aquella no retenida en los poros del material (agua de rebose, agua de base).

primeras extracciones, ya que en la última (E5) el volumen de agua recogido fue insuficiente para realizar las medidas necesarias con los sensores disponibles.

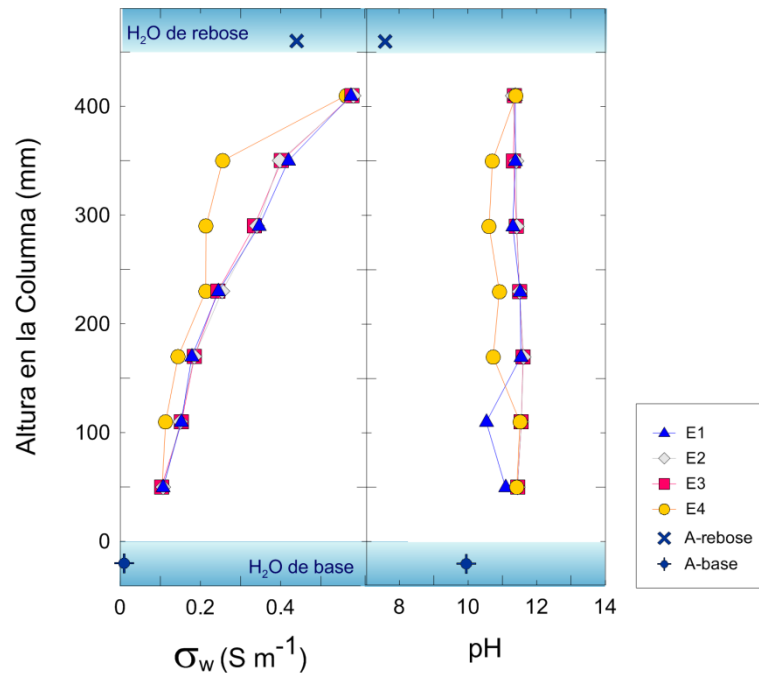


Figura 3.6. Datos de conductividad eléctrica (σ_w) y pH en las muestras de agua de la columna. [E1, E2, E3 y E4] Agua obtenida a partir de las extracciones 1, 2, 3 y 4, respectivamente; [A-rebose] Agua de rebose en zona superior de la columna; [A-base.] Agua recogida en el depósito inferior de la columna.

A lo largo de la columna, el valor del pH no sufre grandes variaciones en el agua intersticial, presentando valores inferiores en E4 respecto de las tres primeras extracciones. Por su parte, el agua de base muestra un valor inferior a los registrados en el agua extraída a lo largo de la columna, mientras que el agua de rebose presenta un valor prácticamente neutro. Para interpretar este comportamiento hemos representado en la Figura 3.7 las concentraciones de Ca_{Total} de cada una de las muestras de agua de la columna (determinadas mediante ICP-MS) sobre el diagrama de estabilidad de la calcita ($CaCO_3$) y la portlandita ($Ca(OH)_2$), para distintas presiones parciales de CO_2 (P_{CO_2}).

El agua de base, se encuentra en el equilibrio químico calcita-portlandita. A medida que asciende en la columna, el sistema se aleja de la interfaz $CaCO_3/Ca(OH)_2$ y la portlandita deja de ser una fase estable, disolviéndose conforme el agua avanza hacia zonas superiores de la columna. Esto se refleja en un incremento de la concentración de Ca_{Tot} para una P_{CO_2} aproximadamente constante ($\sim 10^{-10}$ bar). El aumento de la P_{CO_2} en el agua de rebose, como consecuencia del contacto directo con la atmósfera durante el tiempo de exposición previo al muestreo (2 días), provoca una variación del pH respecto del medido en el agua intersticial extraída del punto más elevado de la columna (41.3 cm); aunque insuficiente para desestabilizar la calcita, por lo que la concentración de Ca_{Tot} permanece invariable respecto de la posición de muestreo.

El aumento de la P_{CO_2} observado entre las primeras extracciones y la última, en el agua intersticial de las posiciones centrales de la columna, parece estar relacionado con las características del muestreo. En estas posiciones (34.7, 28.6, 22.8 y 17 cm de altura en la columna), la última extracción analizada (E4) presentó un volumen de agua inferior y un mayor tiempo de residencia en la jeringa (menor velocidad de llenado), que el resto de los puntos de muestreo (41.3, 11 y 5 cm de altura).

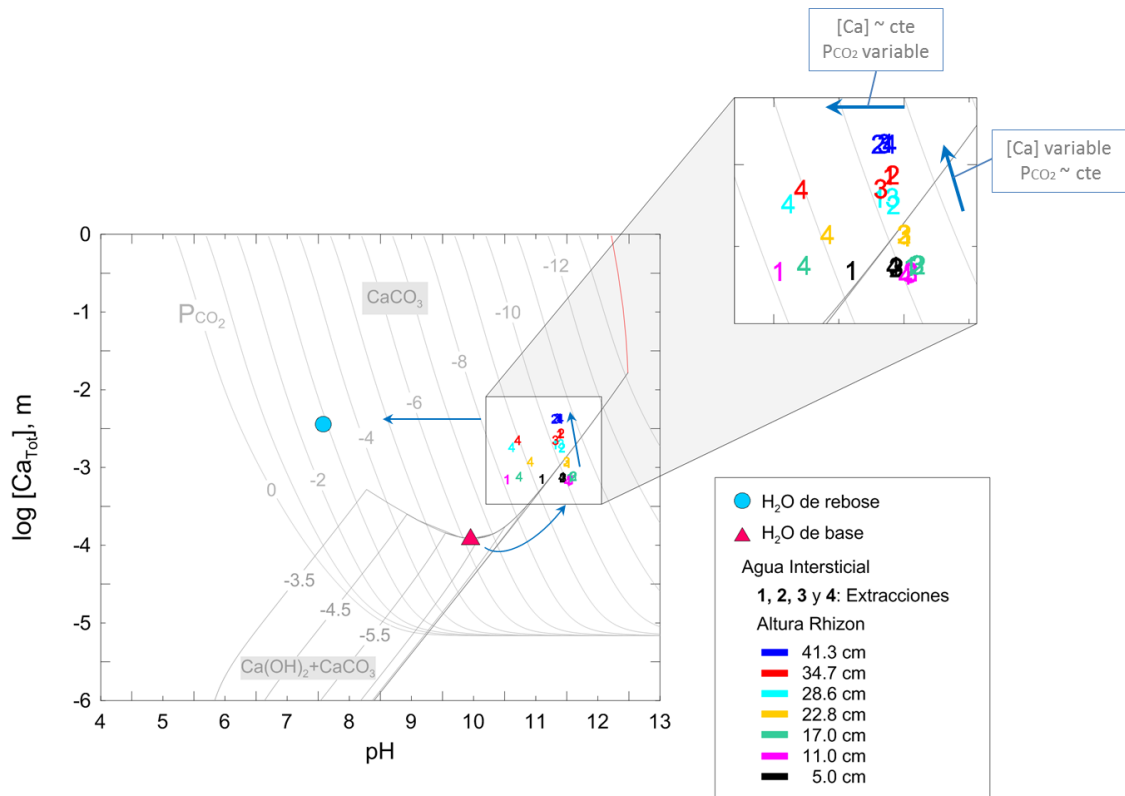


Figura 3.7. Concentración total de Ca respecto del pH, obtenida en el agua muestreada (agua intersticial, de rebose y de base). Las curvas en trazo gris indican la solubilidad de la calcita y de la asociación porlandita+calcita, para distintas presiones parciales de CO_2 (P_{CO_2}). Los números y su color indican orden y cota de extracción, respectivamente.

Por su parte, la conductividad eléctrica del agua varía con la posición del punto de muestreo (Figura 3.6). En general, la tendencia de la conductividad eléctrica es de aumentar con la altura, un efecto relacionado con los fenómenos de disolución y transporte propios de un proceso de lavado. El agua entra en el sistema por la zona inferior de la columna, disolviendo parte de las partículas que encuentra a su paso y aumentando su concentración respecto de su valor inicial.

Como ya hemos apuntado, la conductividad eléctrica del agua de poro puede inferirse a partir de la conductividad eléctrica del suelo y de sus propiedades físicas. En la literatura se puede encontrar numerosos trabajos relacionados con la búsqueda de aproximaciones empíricas que permitan llevar a cabo este tipo de ajuste (Archie, 1942; Rhoades *et al.*, 1976; Nadler y Frenkel,

1980; Rhoades y Oester, 1986; Rhoades *et al.*, 1989; Vogeler *et al.*, 1996; Amente *et al.*, 2000; Muñoz-Carpena *et al.*, 2001).

En nuestro trabajo, hemos desarrollado un ensayo de calibración de la respuesta eléctrica de los serrines de granito bajo condiciones de muestreo controladas. A partir de este ensayo ajustamos los parámetros empíricos correspondientes a tres aproximaciones que permiten relacionar la conductividad eléctrica con las propiedades físicas del medio poroso y la conductividad eléctrica del agua intersticial:

◆ Modelo de Archie (1942)

$$\sigma_b = \frac{\phi^{1.36} \sigma_w S_w^{1.53}}{1.002} \quad \text{e.3.11.}$$

◆ Modelo de Rhoades *et al.* (1976)

$$\sigma_b = (1.61 \theta + 0.05) \theta \sigma_w + 0.03 \quad \text{e.3.12.}$$

◆ Modelo de Vogeler *et al.* (1996)

$$\sigma_b = (-0.56 \theta + 0.647) \sigma_w + (0.26 \theta - 0.15) \quad \text{e.3.13.}$$

Las variables asociadas a las ecuaciones e.3.11, e.3.12 y e.3.13, son: σ_b , conductividad eléctrica del medio; ϕ , porosidad; θ , contenido volumétrico en agua; σ_w , conductividad eléctrica del agua; S_w , grado de saturación.

El Anexo I.B recoge de forma detallada la instrumentación, metodología y análisis de resultados, de este ensayo de calibración.

De los datos puntuales de conductividad eléctrica registrados, y conocidos los valores de porosidad y contenido volumétrico en agua de la zona muestreada, se elaboran curvas de conductividad eléctrica de agua intersticial a lo largo de la columna con cada uno de los modelos ajustados (e.3.11, e.3.12 y e.3.13). Las curvas se muestran en la Figura 3.8, conjuntamente con los valores experimentales de conductividad eléctrica del agua intersticial determinados a partir de las extracciones con Rhizon.

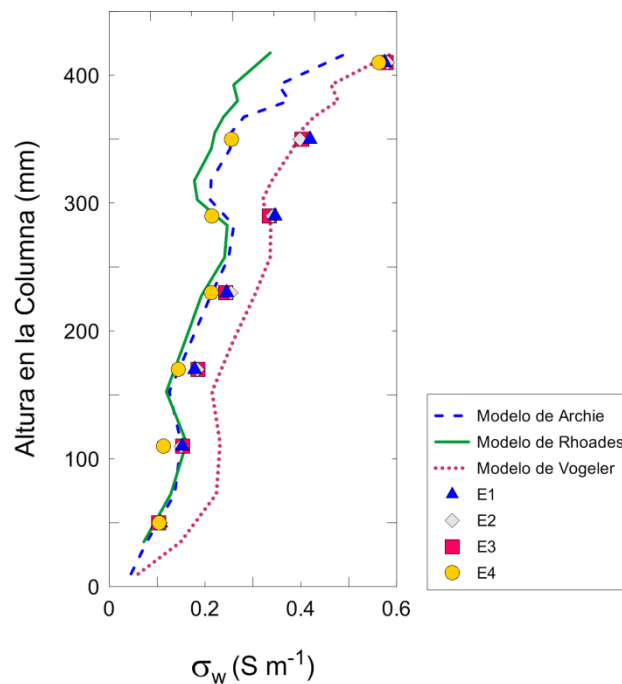


Figura 3.8. Conductividad eléctrica del agua (σ_w). Comparación de los valores observados en el agua extraída respecto de los obtenidos mediante distintas aproximaciones teóricas. [E1-E4] Representan las extracciones secuenciales. Modelos de Archie, de Rhoades y de Vogeler, aproximaciones teóricas de la conductividad eléctrica del agua estimada a partir de los datos de SIPLab y ITRAX GeoScanner.

Los modelos de Archie y Rhoades, ajustan bien los valores experimentales cuando el agua de poro presenta una conductividad eléctrica inferior a 0.3 S m^{-1} . Rhoades *et al.* (1989), señala que este tipo de aproximación se limita a suelos cuyo contenido de agua sea cercano a la capacidad de campo, caso de E4. El modelo de Vogeler ajusta mejor los valores experimentales de alta conductividad ($\sigma_w \geq 0.3 \text{ S m}^{-1}$), incluso en un rango del grado de saturación superior a su capacidad de campo.

4.2.1.2 ANÁLISIS COMPOSICIONAL

El agua extraída fue analizada mediante ICP-MS. En la Figura 3.9 se han ordenado las concentraciones de cationes obtenidas, para cada tipo de agua analizada (intersticial, de rebose y de base). No se han representado los elementos del grupo de las tierras raras, ni aquellos cuya concentración resultó inferior a $0.01 \mu \text{ L}^{-1}$, valores muy cercanos al límite de detección.

Entre los elementos observados con mayor concentración (Na, K, Ca, Mg y Al), destaca el bromo, cuya alta concentración representa una anomalía en este tipo de aguas. Su origen podría estar vinculado a las inclusiones fluidas presentes en los minerales del granito original, liberadas durante los procesos industriales de corte y pulido. La alta concentración de bromo convierte a este elemento en un trazador natural de lixiviados procedentes de serrines de granito.

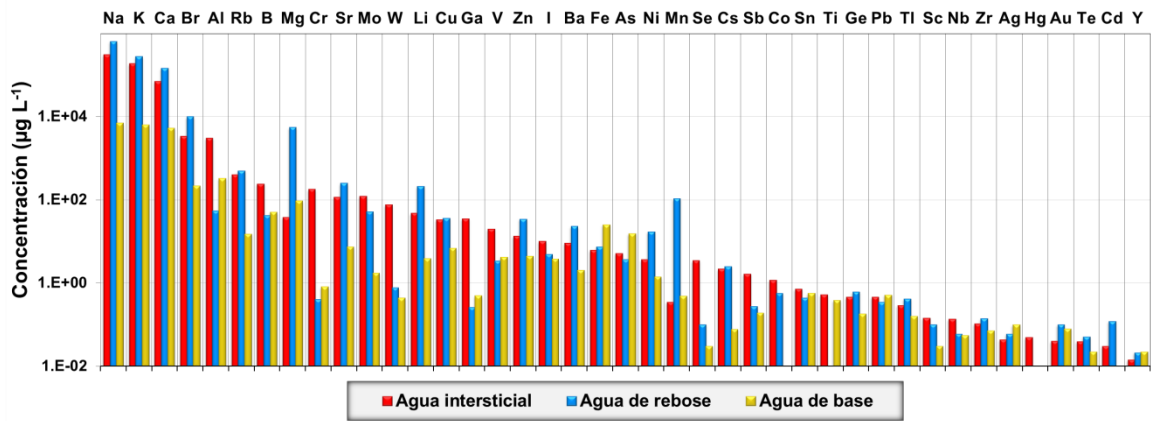


Figura 3.9. Concentración media de cationes en el agua de la columna de serrines de granito. Se consideran las concentraciones del agua intersticial, de rebose y de base. No se representan elementos del grupo de las tierras raras ni los cationes con concentraciones $<0.01 \mu \text{ l}^{-1}$.

En la Figura 3.10 mostramos un diagrama que expresa, de forma relativa, la diferencia de concentración de cada elemento en el agua intersticial respecto a la del agua libre (de rebose o de base), a partir de la siguiente expresión:

$$DR(\%) = \frac{(X_i - \mu_i)}{\mu_i} \quad \text{e.3.14.}$$

en la cual X_i denota la concentración del elemento i en el agua de rebose o de base, y μ_i su concentración en el agua intersticial. El cociente expresa la diferencia relativa entre ambas concentraciones (DR). Valores positivos de DR indicarían la predominancia del elemento en el agua de rebose (azul) o de base (rojo), respecto del agua intersticial, y viceversa. La figura permite reconocer la presencia de cuatro grupos de elementos con un comportamiento diferenciado:

- ◆ Grupo I. Comprenden, de izquierda a derecha, desde el Fe al Mn. Se trata de elementos fraccionados preferencialmente en el agua de rebose y de base.
- ◆ Grupo II. De izquierda a derecha, desde el Zr al Cd. Se trata de elementos fraccionados preferentemente en el agua de rebose. Además, su presencia en el agua de base es inferior a la del agua intersticial.
- ◆ Grupo III. Representado por dos elementos: As y Pb. Su comportamiento es antagónico al Grupo II. En este caso, los elementos se concentran diferencialmente en el agua de base.
- ◆ Grupo IV. Comprende, de izquierda a derecha, desde el Sn al Hg. Conjunto de elementos que manifiestan mayor afinidad por el agua intersticial.

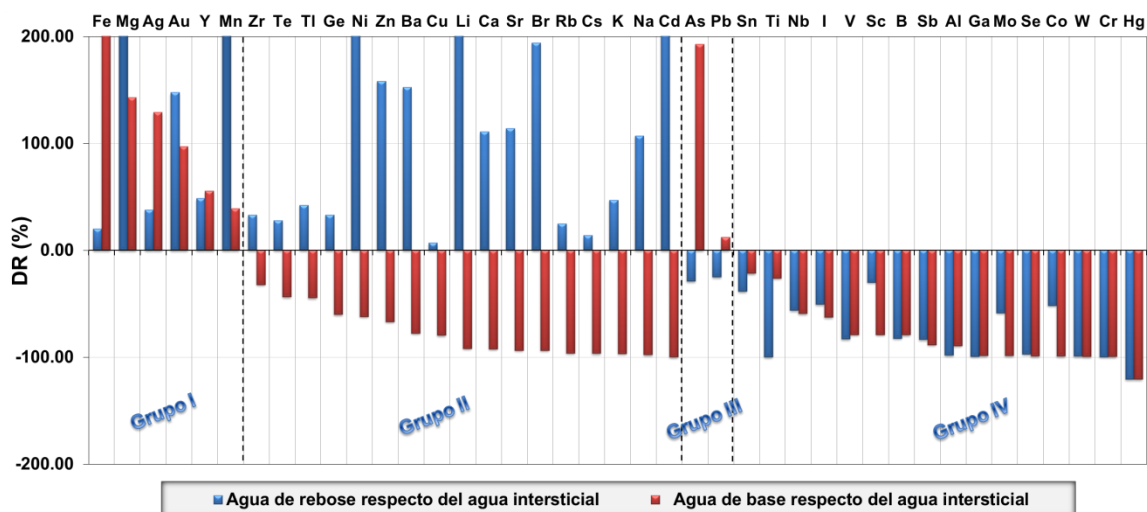


Figura 3.10. Diferencia relativa (*DR*) entre concentraciones medias de cationes en el agua intersticial y en el agua de rebose y de base, en la columna de serrines de granito.

En el Grupo I aparecen los elementos con alta movilidad; en el Grupo IV, los elementos de baja movilidad. Entre los elementos móviles aparecen el Fe y el Mn, los cuales constituyen importantes componentes de los minerales formadores de las costras de precipitación secundaria reconocidas en los serrines de granito (Vázquez, 2005; Delgado *et al.*, 2006; Barrientos *et al.*, 2010). Estas costras aparecen preferencialmente en zonas de oxidación, localizadas en zonas de contacto serrines/aire, por lo que cabe esperar que se formen este tipo de estructuras en la zona superior y la base de la columna de serrines.

El As y el Pb (Grupo III) podrían haber estado afectados por fenómenos de retrodifusión, ya que su concentración es mayor en el agua de base, inicialmente destilada, que en el agua intersticial y la de rebose. Por su parte, el Grupo II está representado por una gran cantidad de elementos, entre los que cabe destacar la presencia de aquellos que aparecen en mayor concentración en el sistema (Na, Ca, K, Br); aunque la concentración de estos es relativamente mayor en el agua de rebose, la que presenta el agua intersticial es también elevada.

Una propiedad relevante a la hora de estudiar la capacidad que posee un medio sólido específico para retener ciertos contaminantes iónicos (p. ej. metales), es el punto de carga cero o punto isoeléctrico (Vázquez *et al.*, 2008). Este parámetro define el valor de pH para el que una superficie mineral cambia el signo de su carga eléctrica. Es característico para cada sólido e independiente de la composición de la solución.

La determinación del punto de carga cero en serrines de granito presentada por Vázquez *et al.* (2008), se llevó a cabo a partir de tres disoluciones de NaCl de distinta concentración (10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3} M), en las cuales se añadió una pequeña cantidad de serrines de granito (0.02 g). El potencial eléctrico de la disolución fue medido, a la vez que se variaba el pH.

En la Figura 3.11 se presentan los resultados obtenidos durante el ensayo de determinación del punto de carga cero en serrines de granito. Podemos observar cómo para valores de pH ácidos (<4), los serrines presentan un potencial de carga positivo, siendo susceptibles de atraer iones con carga negativa. A medida que la solución se vuelve más básica, en la superficie de las partículas cambia la carga neta superficial, mostrando un creciente carácter negativo con el aumento del pH. Por tanto, las partículas de los serrines, en presencia de soluciones con $\text{pH} > 4$, se comportan como cargas negativas capaces de retener iones positivos en disolución.

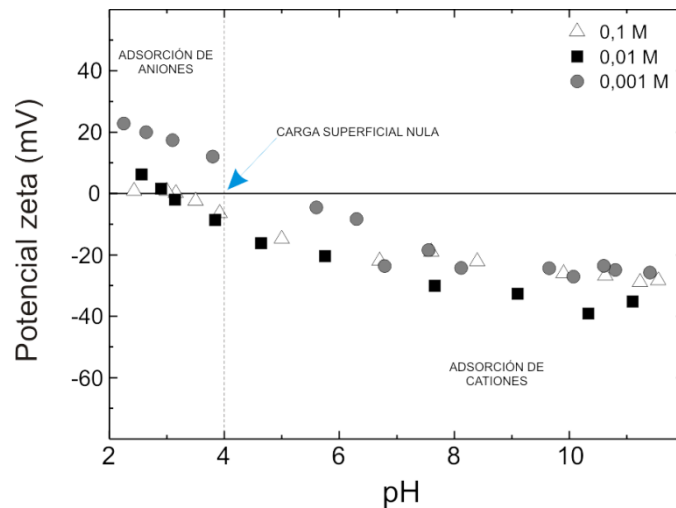


Figura 3.11. Punto de carga cero para los serrines de granito. 0.1 M, 0.01 M y 0.001 M, concentración molar de tres soluciones de NaCl.

El marcado carácter básico del agua intersticial de la columna, permite que muchos de los elementos del Grupo IV (Figura 3.10), sean susceptibles de quedar retenidos en la superficie de las partículas de los serrines. Por su parte, los elementos del Grupo II, también se verían afectados por esta retención; aunque, en este caso, la mayor concentración de estos componentes en el agua terminaría por saturar la superficie de las partículas sólidas con cargas positivas. A partir de esta saturación, se invierte la carga de dichas partículas, produciéndose la repulsión del resto de iones hacia zonas de mayor estabilidad (agua de rebose).

◆ CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA EUROPEA

En la Decisión del Consejo de la Unión Europea de 19 de diciembre de 2002, se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE. En el apartado referente a los residuos inertes, grupo en el que se engloban los serrines de granito (Vázquez, 2005), aparecen los valores máximos permitidos en lixiviados procedentes de este tipo de materiales. En la Tabla 3.2 se comparan los valores límite para cumplimiento de la Directiva, determinados mediante ensayos de percolación, respecto de la concentración presentada por los tres tipos de agua analizadas durante el ensayo de columna con serrines de granito.

Tabla 3.2. Comparación de resultados del agua analizada en la columna de serrines de granito respecto del valor normativo (2003/33/CE), para ensayos de percolación en residuos inertes.

Componente	C ₀ (mg L ⁻¹)	A-de Rebose (mg L ⁻¹)	A-de Base (mg L ⁻¹)	A-Intersticial (mg L ⁻¹)
As	0.06	0.0037	0.0151	0.0052
Ba	4	0.0228	0.002	0.009
Cd	0.02	0.0001	0	0.0001
Cr	0.1	0.0004	0.0008	0.1765
Cu	0.6	0.0355	0.0068	0.0332
Hg	0.002	0	0	0.0001
Mo	0.2	0.0506	0.0017	0.1221
Ni	0.12	0.0169	0.0014	0.0036
Pb	0.15	0.0003	0.0005	0.0005
Sb	0.1	0.0003	0.0002	0.0016
Se	0.04	0.0001	0	0.0034
Zn	1.2	0.0342	0.0044	0.0132

* C₀, Valores límite para lixiviados de residuos inertes (2003/33/CE) a partir de ensayos de percolación; A-de Rebose: agua de la zona superior de la columna de serrines de granito; A-de Base: agua de la zona inferior de la columna de serrines de granito; A-Intersticial: agua de poro de la columna de serrines de granito.

El cromo total en el agua intersticial analizada es el único valor superior al límite permitido. Sin embargo, además de quedar reflejado en la tabla, se señaló con anterioridad que el Cr es uno de los elementos con afinidad por permanecer en el agua de poro del material (ver Figura 3.10). El resto de componentes están, en la mayoría de los casos, al menos un orden de magnitud por debajo de los límites máximos exigidos por la Directiva. Esto es coherente con los resultados de lixiviación estática presentados por Vázquez (2005).

◆ ANÁLISIS DEL AGUA INTERSTICIAL

El gran volumen de datos disponibles exige un procedimiento exploratorio que permita sugerir agrupamientos coherentes en cuanto al comportamiento de los distintos elementos, esto es, un proceso de compresión de la información. Para ello, hemos llevado a cabo un análisis factorial por componentes principales (AFCP) con los datos de concentración de cationes que presentaba el agua intersticial de la columna, con el objetivo de crear un conjunto de factores que resuman la información aportada por la gran cantidad de cationes existentes.

El AFCP es un método estadístico perteneciente al análisis multivariante, cuya principal aportación consiste en la síntesis de información mediante la reducción de múltiples variables, a un conjunto de factores menor. Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, se pretende conocer si éstas pueden ser reducidas a un número menor de factores, construidos a partir de las originales y perdiendo la menor cantidad de información posible (Peña, 2002).

En nuestro caso, el número de factores resultantes (componentes principales) ha sido 8, mediante rotación Varimax. Con este número de componentes recogemos el 88.7% de la información de los datos (total de varianza explicada). Este dato es indicador de la bondad de la metodología: se ha conseguido reducir los 41 cationes iniciales en 8 componentes y sólo perder un 11.3% de la información inicial.

En la Tabla 3.3 se presentan los resultados de la agrupación en componentes principales llevada a cabo con las concentraciones de cationes del agua intersticial de la columna de serrines de granito. El peso de cada variable en el componente factorial, viene indicado por su índice factorial, el cual expresa la relación entre las variables y el componente.

A partir del análisis de los índices factoriales (Tabla 3.3), se pueden considerar los componentes principales como función de las distintas variables que, según su aportación máxima (en valor absoluto), mejor quedan explicadas en cada uno de ellos:

- ◆ Componente 1: Al, As, Ba, Br, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, I, K, Li, Mo, Na, Ni, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, V, W.
- ◆ Componente 2: Au, Mg, Pb.
- ◆ Componente 3: B, Hg, Nb.
- ◆ Componente 4: Ge, Tl.
- ◆ Componente 5: Fe, Zn.
- ◆ Componente 6: Sc, Ti.
- ◆ Componente 7: Ag, Mn, Y.
- ◆ Componente 8: Te.

En la Figura 3.12, se ilustra la distribución del Na, Mg, B, Tl, Fe, Ti, Mn y Te (como elementos representativos de sus respectivos componentes principales), respecto de la cota en la columna y extracción. En la misma, los valores obtenidos se han estandarizado con el fin de minimizar el efecto de la diferencia de magnitud entre variables, para poder llevar a cabo un análisis comparativo de sus tendencias.

Tabla 3.3. Resultados del análisis de componentes principales de la distribución cationes en el agua intersticial de la columna de serrines de granito.

Variable	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
Ag	-0.04	0.18	0.05	-0.07	-0.06	0.01	0.78	-0.09
Al	-0.85	0.05	0.19	0.35	-0.04	-0.15	-0.04	0.15
As	0.92	0.01	0.18	0.02	0.07	0.05	0.02	-0.20
Au	-0.14	0.86	-0.06	-0.07	-0.04	-0.16	0.19	-0.15
B	-0.12	0.02	0.66	0.64	0.06	0.09	-0.11	-0.06
Ba	0.96	0.03	-0.15	0.11	-0.01	0.01	-0.01	0.09
Br	0.97	-0.02	-0.15	0.07	-0.01	0.03	-0.03	0.07
Ca	0.95	0.03	-0.18	0.10	-0.02	-0.01	-0.02	0.12
Cd	0.79	0.26	0.02	-0.04	-0.03	-0.03	-0.13	0.26
Co	0.98	0.05	0.00	0.09	0.05	0.10	-0.01	-0.04
Cr	0.95	0.00	0.09	0.01	0.11	0.17	0.01	-0.10
Cs	0.98	-0.08	-0.06	0.10	0.03	0.09	-0.05	0.01
Cu	0.84	0.41	0.11	0.17	0.00	0.06	0.04	-0.14
Fe	0.20	0.20	0.17	0.00	0.90	0.06	-0.05	0.06
Ga	-0.71	0.07	0.42	0.51	0.01	-0.06	-0.05	0.06
Ge	0.30	0.48	-0.08	0.58	0.10	0.08	0.20	0.03
Hg	-0.20	0.39	0.50	0.01	-0.07	0.24	0.17	-0.35
I	0.74	-0.06	-0.15	0.15	0.02	0.47	-0.16	-0.07
K	0.99	-0.01	-0.06	0.12	0.01	0.06	-0.02	0.03
Li	0.93	0.18	-0.17	0.02	-0.03	-0.02	-0.01	0.04
Mg	0.43	0.80	-0.03	0.13	-0.03	0.07	0.03	0.16
Mn	0.25	-0.01	-0.01	0.43	-0.03	0.15	0.68	0.27
Mo	0.98	0.10	-0.02	0.03	0.04	0.07	0.03	-0.01
Na	0.99	0.00	-0.05	0.11	0.01	0.06	-0.02	0.03
Nb	-0.09	-0.08	0.91	-0.11	0.02	-0.20	-0.08	0.06
Ni	0.96	0.08	0.02	0.15	0.03	0.02	0.06	0.10
Pb	-0.07	0.80	0.18	0.21	0.16	-0.14	-0.17	0.32
Rb	0.98	-0.03	-0.06	0.11	0.01	0.07	-0.03	0.02
Sb	-0.91	0.01	0.22	0.24	-0.03	-0.09	-0.05	0.08
Sc	0.24	0.10	-0.07	-0.08	-0.31	0.48	-0.20	0.38
Se	0.98	0.02	-0.02	0.02	0.05	0.12	-0.04	-0.03
Sn	0.86	-0.13	0.15	0.21	0.22	0.16	0.11	0.11
Sr	0.96	0.01	-0.17	0.08	-0.03	0.01	-0.02	0.09
Te	-0.09	0.12	-0.04	-0.04	0.17	0.07	0.15	0.85
Ti	0.21	-0.24	-0.01	-0.05	0.11	0.85	0.11	0.06
Tl	0.29	0.08	0.01	0.82	0.01	-0.11	0.02	-0.08
V	-0.90	0.03	0.33	0.23	-0.02	-0.07	-0.05	0.00
W	0.90	0.05	0.20	0.16	0.12	0.17	-0.01	-0.10
Y	0.22	0.20	-0.08	0.04	-0.07	0.41	-0.53	-0.25
Zn	0.05	-0.10	0.04	0.05	0.96	-0.03	-0.03	0.10
Zr	-0.05	0.04	0.81	0.10	0.19	0.03	0.18	-0.04

* C_1 a C_8 , componentes principales (rotación varimax); Valor en azul, peso máximo de la variable.

De entre los ocho componentes principales, el Componente 1 (representado por el Na, Figura 3.12), es el que recoge a la mayor parte de los elementos mayoritarios en el agua intersticial de la columna. Se puede observar la coincidencia entre la distribución del Na y la de la conductividad eléctrica del agua, para las tres primeras extracciones (Figura 3.6).

El resto de elementos de la Figura 3.12 muestran distintos comportamientos en relación con la cota y la extracción considerada. Como representantes de un determinado componente principal, la distribución de cada uno de ellos en el sistema es indicativa del comportamiento del resto de elementos vinculados al componente principal considerado.

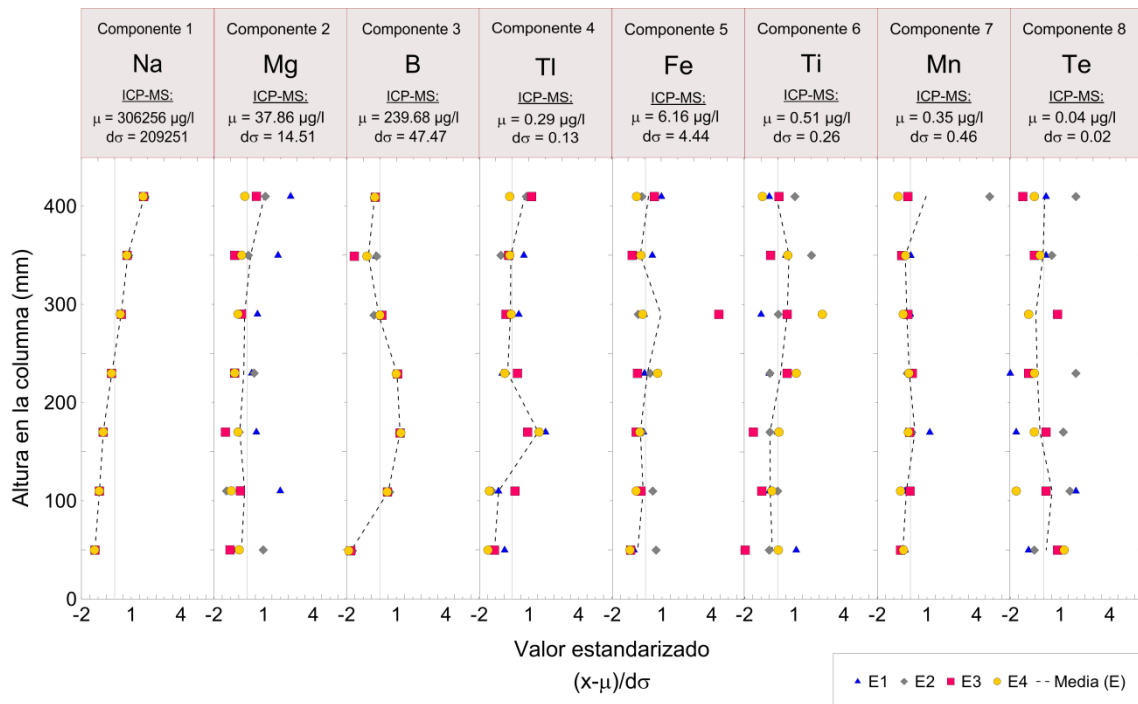


Figura 3.12. Tendencia de la distribución del Na, Mg, B, Tl, Fe, Ti, Mn y Te, como elementos representativos de los componentes principales, en los que mejor quedan recogidos; [E1-E4] representan las extracciones secuenciales; μ y $d\sigma$, valor promedio y desviación típica, respectivamente, de la concentración del elemento en el agua intersticial.

4.2.2 APLICACIÓN HIDRODINÁMICA

Tras alcanzarse la máxima saturación en la columna de serrines de granito, se llevó a cabo un análisis mediante excitación con rayos-X de la evolución del grado de saturación en la misma. Con ello, se pretendía determinar el momento a partir del cual el sistema alcanzaba una situación estacionaria, como punto de partida para la fase de deshidratación del ensayo, descrita en el apartado 3.2.2.

En la Figura 3.13 se representa la evolución en la distribución del grado de saturación en la columna transcurridos 10 min y un día, desde el momento de alcanzar la inundación superior de la columna (rebose). El perfil de la Figura 3.13-B se observa suavizado respecto al ilustrado en la Figura 3.13-A, lo cual sugiere la homogenización en la distribución del agua en el seno del

medio poroso. Esta situación estacionaria alcanzada, marca el comienzo de la fase de deshidratación inducida mediante extractores Rhizon.

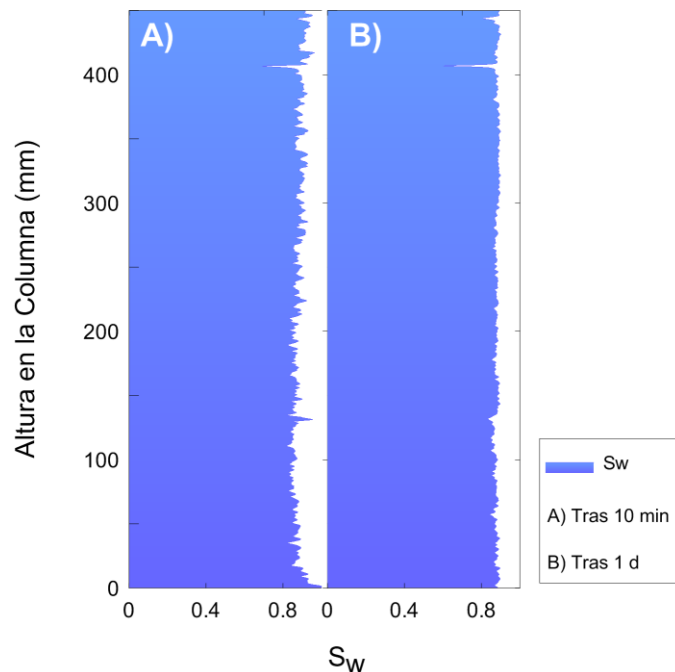


Figura 3.13. Evolución del perfil del grado de saturación: A) perfil transcurridos 10 minutos desde la inundación superior; B) tras un día de la inundación.

Tal y como se comentó con anterioridad, un total de 7 Rhizon de 5 cm de longitud son insertados a diferentes cotas dentro de la columna de ensayo. Desde ellos, de forma simultánea, se extrajo agua intersticial por succión empleando jeringas de 10 cm³ de capacidad. El proceso se repitió en cinco ocasiones, de las cuales sólo en las cuatro primeras fue posible obtener un volumen suficiente de agua para realizar las determinaciones. La última determinación sólo se tuvo en cuenta en términos del balance total de agua extraída.

Durante la extracción se llevó a cabo un control detallado del llenado de las distintas jeringas, permitiendo elaborar curvas de caudal para cada Rhizon y extracción. En la Figura 3.14 podemos observar cómo la evolución del proceso de llenado es dependiente de la posición del extractor, así como del grado de saturación de la columna (S_w). La primera extracción muestra una evolución lineal durante el llenado en todos los Rhizon, reduciéndose el S_w en la columna desde ~ 0.91 hasta ~ 0.82 . Interpretamos que este comportamiento lineal es debido a la escasa oposición del agua contenida en el suelo a ser extraída, lo cual refleja una escasa capacidad de retención por parte del material.

Durante la segunda extracción continúa la linealidad hasta sus estadios finales, momento a partir del cual comienza a observarse una diferenciación en el comportamiento de los Rhizon 3, 4, 5 y 6, respecto del 1, 2 y 7. En ese momento, el S_w se ha rebajado hasta ~ 0.76 . La tercera extracción muestra una clara inflexión en la linealidad de forma más temprana que en el caso

anterior, alcanzándose un S_w de ~ 0.70 . Finalmente, la cuarta extracción refleja una marcada curvatura ya desde estadios iniciales del proceso extractivo. El S_w se reduce hasta ~ 0.65 .

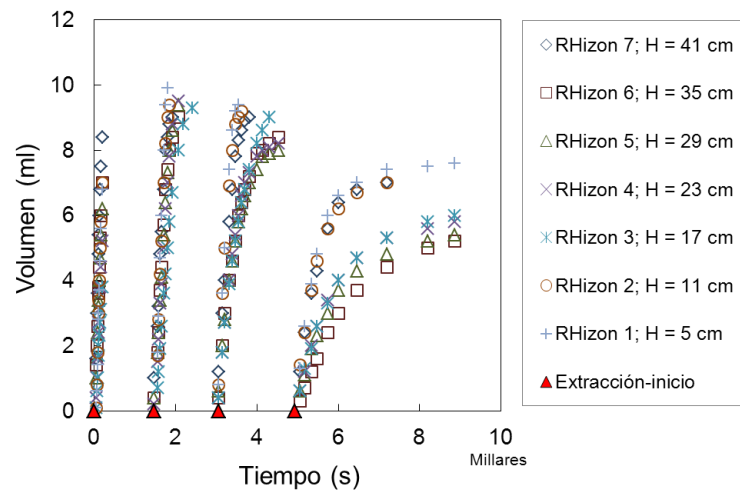


Figura 3.14. Datos de caudal registrados durante la fase de deshidratación. Proceso de llenado de jeringas acopladas a extractores Rhizon. H representa la cota aproximada de inserción de cada Rhizon en la columna de ensayo.

El comportamiento de los Rhizon 1, 2 y 7, muestra una mayor drenabilidad del agua de poro. Los Rhizon 1 y 7 representan los extremos del sistema, con lo que en ambos casos existe cierto grado de libertad respecto al resto de Rhizon, los cuales están afectados por la interferencia de los extractores adyacentes.

Centrándonos en la extracción 4, observamos como la cota del Rhizon en la columna condiciona la forma de la curva. Es decir, la drenabilidad es menor cuanto mayor es la cota a la que se lleva a cabo la extracción. Este fenómeno puede explicarse por el efecto de la componente vertical de la conductividad hidráulica durante los periodos entre dos procesos extractivos consecutivos, en los que se produce una relajación del sistema. De esta manera, el grado de saturación de los serrines de granito tiende a ser mayor conforme descendemos en la columna.

El S_w a partir del cual las curvas de caudal pierden su linealidad está marcando la capacidad de campo de los serrines, a las condiciones de ensayo. Por encima de este valor, el suelo pierde su capacidad de retención y el agua drena por gravedad. En este caso, no se puede determinar un valor teórico de forma directa, porque existen fenómenos de recarga de agua en el volumen afectado por la extracción, dentro de la zona de influencia del Rhizon entre dos procesos extractivos consecutivos.

Para evaluar la magnitud de esta recuperación, se elaboraron curvas experimentales $K - S_w$ (conductividad hidráulica Vs. grado de saturación). La determinación de la conductividad hidráulica del material se llevó a cabo a partir de los parámetros de forma de los Rhizon y la evolución del caudal extraído, aplicando los métodos de Gilg-Gavard o la aproximación de

Cedergren para el método de Hvorslev, descritos con anterioridad (apartado 3.2.2.2). El grado de saturación asociado a cada valor de conductividad hidráulica se obtiene a partir del conocimiento de las propiedades físicas que presenta el volumen de material muestreado, delimitado por el radio de influencia máximo de cada Rhizon.

4.2.2.1 CURVAS EXPERIMENTALES $K-S_w$

Al final del proceso de hidratación, y una vez alcanzada la condición de estado estacionario, la columna presenta una porosidad y un grado de saturación medio de $\sim 0.58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y ~ 0.91 , respectivamente. Bajo la condición de capacidad de retención nula (deducible de la linealidad que muestran los datos de caudal de la primera extracción, Figura 3.14), puede determinarse el radio de influencia máximo para los estadios iniciales en cada uno de los Rhizon, empleando para ello la ecuación e.3.6. Sustituyendo los valores obtenidos en la expresión e.3.5, se obtiene un valor medio para α de 0.2 kPa^{-1} , el cual es muy cercano al evaluado experimentalmente para los serrines de granito (Barrientos *et al.*, 2010). A partir de este punto, se calcula el radio de influencia máximo, empleando la ecuación e.3.5 para un incremento de presiones determinado por la diferencia de altura de agua en la jeringa entre dos observaciones consecutivas.

Del mismo modo, sustituyendo el radio de influencia original en la expresión e.3.4, se obtiene un valor de la conductividad hidráulica saturada (K_s) en cada punto de muestreo. El valor medio estimado en la columna de serrines de granito es de $1.7 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

Conocido el radio de influencia de cada Rhizon y su longitud, puede estimarse el volumen de material afectado por la extracción en cada caso (V_b). Con el valor de la porosidad media, ϕ , el valor de V_b , el contenido volumétrico en agua (determinado a partir de los datos experimentales de absorción de rayos-X) y el volumen de agua extraído, V_e , respecto del volumen de agua inicial, V_w , es posible conocer el grado de saturación que presenta el volumen afectado en cada instante del muestreo. Ello se verifica a través de la siguiente expresión:

$$S_w = \frac{V_w - V_e}{\phi \cdot V_b} \quad \text{e.3.15.}$$

Teniendo en cuenta el área de la jeringa y el volumen de agua extraída, se calculan los niveles parciales del llenado para cada Rhizon durante la primera extracción. Con los pares de valores nivel-tiempo, se emplean los métodos de Hvorslev (mediante la aproximación de Cedergren) y Gilg-Gavard (e.3.8 y e.3.10, respectivamente), para obtener la conductividad hidráulica del suelo en cada instante. A través de la expresión e.3.15, se determina el grado de saturación asociado a cada valor de conductividad hidráulica no saturada (K), y se ajustan relaciones de tipo exponencial $K - S_w$ para ambos métodos durante la primera extracción.

El tiempo de relajación entre dos extracciones induce un reajuste parcial del sistema agua-suelo, con lo que el grado de saturación inicial de la nueva extracción se infiere a partir del

ajuste exponencial previo. De la condición inicial estimada, se ajustan el resto de valores de la extracción mediante la expresión e.3.15, en la que el volumen de suelo es calculado, a su vez, con la expresión del radio de influencia e.3.5. Los pares $K - S_w$ obtenidos se acumulan a los de la extracción anterior generándose un nuevo ajuste exponencial, con el cual se estima la condición inicial de la siguiente extracción.

El procedimiento se repite hasta la última extracción, obteniéndose un ajuste de los datos experimentales para cada Rhizon y método. El resultado final es una curva para cada método con los datos de todos los Rhizon y extracciones, en tanto que el objetivo del ejercicio es determinar cuál de los dos métodos ofrece mejor ajuste (Figura 3.15).

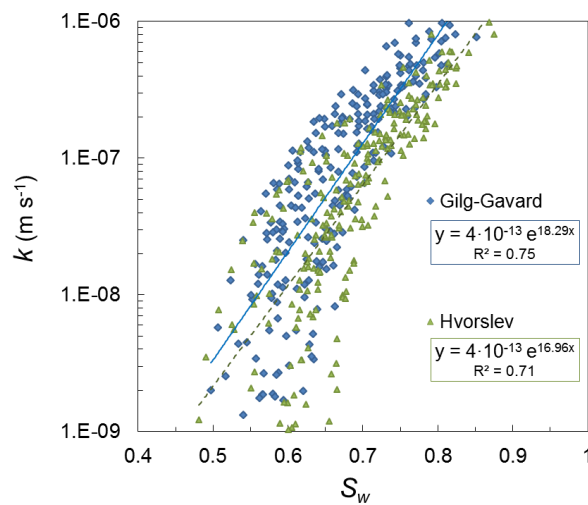


Figura 3.15. Representación de los datos experimentales $K - S_w$ obtenidos con los métodos Gilg-Gavard y Hvorslev, a partir de los datos de caudal obtenidos mediante la extracción con Rhizon.

Las expresiones correspondientes al mejor ajuste exponencial, obtenidas para cada método, son las siguientes:

◆ Gilg-Gavard

$$K = 4 \cdot 10^{-13} e^{18.29(S_w)} \quad \text{e.3.16.}$$

◆ Hvorslev

$$K = 6 \cdot 10^{-13} e^{16.96(S_w)} \quad \text{e.3.17.}$$

Empleando estas expresiones puede evaluarse el grado de saturación asociado a la pérdida de linealidad en las curvas de caudal (Figura 3.14), el cual muestra valores comprendidos entre ~ 0.7 y ~ 0.73 . Esta estimación representa la capacidad de campo de los serrines de granito en las condiciones de ensayo.

En ambas aproximaciones (Gilg-Gavard, Hvorslev), se observa un incremento en la dispersión de los datos para valores de conductividad hidráulica inferiores a 10^{-8} m s^{-1} lo cual, de acuerdo con Di Bonito (2005), representaría el valor límite de efectividad de los Rhizon. Este fenómeno está influenciado por la reducción de la porosidad de la membrana de la herramienta, relacionada con fenómenos de oclusión por partículas minerales finas durante las extracciones secuenciales (Figura 3.16). Al obturarse parte de las vías de acceso de agua, disminuye su capacidad drenante, ralentizándose el lavado. Ello induce una tasa de disminución en la conductividad hidráulica del material, que parecería inferior a la real.

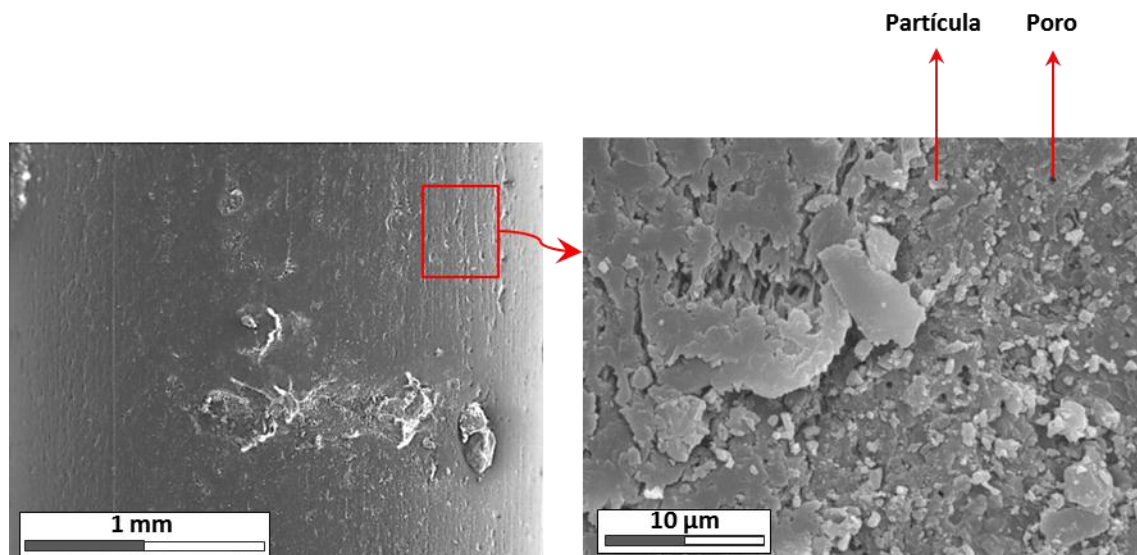


Figura 3.16. Membrana porosa del Rhizon tras una proceso de extracción. Imagen en detalle de granos minerales obstruyendo los poros de la superficie de la membrana.

4.2.2.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE LAS CURVAS EXPERIMENTALES $K-S_w$

Conocidos los parámetros de la curva de retención de un material (Van Genuchten, 1980) y el grado de saturación que presenta, es posible determinar la conductividad hidráulica en suelos no saturados, aplicando el modelo de Mualem-Van Genuchten *MVG* (Vogel *et al.*, 2000):

$$K(h) = K_0 \left[S_e^L \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \right] \quad \text{e.3.18.}$$

El parámetro K define la conductividad hidráulica en suelos no saturados en función de la presión de poro del mismo (h), mientras que K_0 hace referencia al valor inicial de la conductividad hidráulica. L es un factor dependiente de la tortuosidad de las trayectorias de

flujo y la conectividad de los poros. Normalmente se supone que $K_0 = K_s$ y $L = 0.5$ (Mualem, 1976), aunque trabajos más recientes, basados en redes neuronales (Schaap y Leij, 2000), han demostrado que estas aproximaciones suelen no ser siempre válidas para estimar $K(h)$.

Por su parte, S_e expresa la saturación efectiva, definida por la siguiente expresión:

$$S_e = \frac{(S_w - S_w^r)}{(S_w^s - S_w^r)} \quad \text{e.3.19.}$$

S_w^r y S_w^s representan los valores de saturación residual y saturación máxima, respectivamente; m es un parámetro de ajuste relacionado con la distribución del tamaño de poro en el material.

Este modelo es comúnmente aceptado y utilizado, tanto en la validación de resultados empíricos como en simulaciones del comportamiento de suelos no saturados mediante modelos numéricos (Ophori y Maharjan, 2000; Lambot *et al.*, 2006; Leech *et al.*, 2008). De acuerdo con esta consideración, hemos empleado el modelo MVG para realizar un estudio comparativo con los datos experimentales obtenidos en el proceso de extracción con Rhizon en la columna de serrines de granito. La metodología empleada se describe a continuación.

En primer lugar, se introdujeron los datos de conductividad hidráulica observados en el modelo MVG, obteniendo el valor del grado de saturación teórico para cada uno de ellos. Los parámetros de ajuste de la curva de retención empleados fueron adoptados de trabajos previos (Vázquez, 2005; Barrientos, 2007; Barrientos *et al.*, 2010), suponiendo que $K_0 = K_s$ y $L = 0.5$.

Los resultados del modelo MVG fueron comparados con los observados a partir de la aplicación de la formulación de Gilg-Gavard y Hvorslev (Figura 3.17). La comparación se realiza desde dos enfoques: i) teniendo en cuenta sólo los datos experimentales; ii) teniendo en cuenta los valores ajustados mediante las aproximaciones exponenciales de cada método (e.3.16 y e.3.17).

Los resultados muestran que la relación entre los grados de saturación determinados mediante el modelo MVG y los experimentales muestran una dependencia lineal para ambos métodos. La dispersión en los datos es mayor cuando $S_w < 0.6$, tal y como se apuntó con anterioridad.

Al comparar los valores ajustados mediante las aproximaciones exponenciales de cada método y los obtenidos mediante el modelo MVG, los resultados evidencian una acusada correlación 1:1, en ambos casos. Esto sugiere que los ajustes exponenciales determinados a partir de los métodos de Gilg-Gavard y Hvorslev, permiten determinar curvas $K - S_w$ próximas a las obtenidas de forma teórica mediante el modelo tradicional MVG.

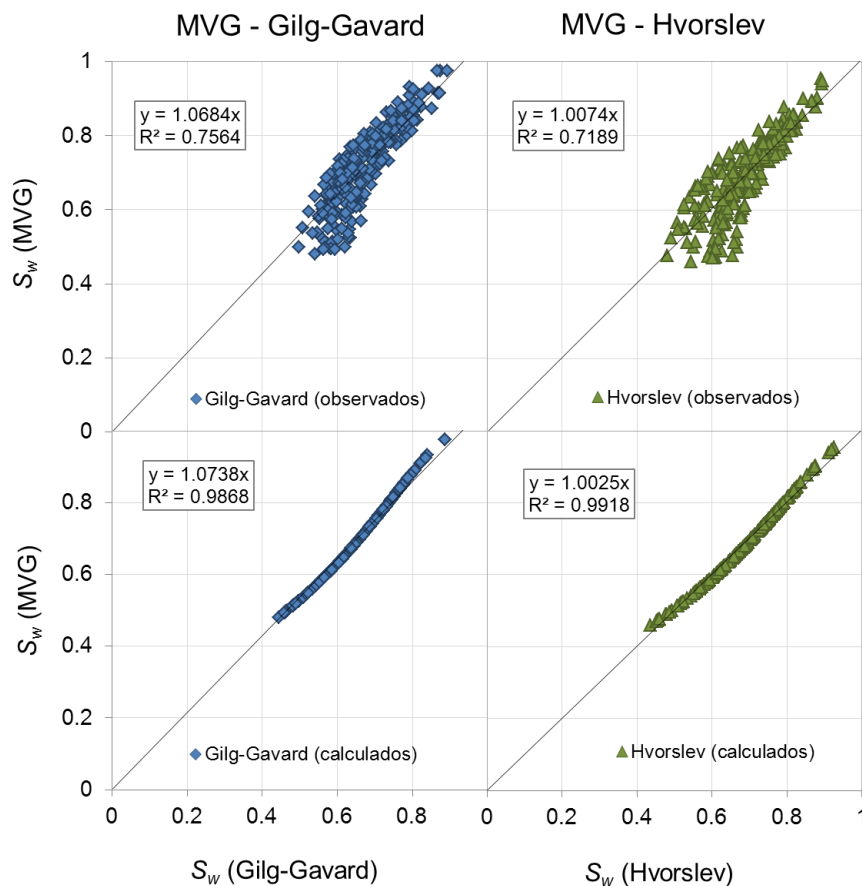


Figura 3.17. Comparación de resultados para el grado de saturación (S_w) determinado mediante los métodos experimentales Gilg-Gavard y Hvorslev, y el modelo teórico MVG. En las gráficas superiores se comparan los datos observados respecto de los valores obtenidos mediante el modelo de MVG; las inferiores comparan los resultados del MVG con el grado de saturación calculado a partir de las aproximaciones exponenciales.

4.3 FASE DE ENVEJECIMIENTO

Una vez desmantelada la columna de ensayo, transcurridos 5 meses desde el final de la fase de deshidratación, se prepararon dos secciones longitudinales con el fin de analizar la composición química y la fábrica de la muestra de serrines de granito alojada en el interior del dispositivo experimental.

Tras determinar su contenido de humedad (variable entre 0 y 5% a lo largo de la columna, creciente hacia zonas inferiores), se llevaron a cabo medidas EDXRF a lo largo de la misma para la determinación de tendencias composicionales.

Este análisis se completa con la fabricación de tres secciones pulidas a partir de muestras localizadas a diferente cota en la columna. Sobre ellas, se ha realizado un estudio de detalle mediante SEM-EDX, para el análisis de los cambios aparecidos en los serrines de granito a resultados del ensayo.

4.3.1 ANÁLISIS EDXRF DE LA COLUMNA

El análisis composicional de la muestra se llevó a cabo a lo largo de una de las secciones longitudinales, empleando el método EDXRF. El objetivo era identificar eventuales tendencias en la distribución de elementos en la columna.

Los resultados obtenidos se presentan mediante una matriz de correlación de forma conjunta con la variable “nivel”, como expresión de la posición muestral en la columna (cota). La relación entre variables es escasa, tanto entre especies químicas, como respecto al nivel de muestreo.

Tabla 3.4. Matriz de correlación que incluye los distintos elementos registrados mediante EDXRF y el nivel de la columna en el que fueron realizadas las medidas (cota).

Nivel*	As	Ca	Co	Cu	Fe	K	Mn	Mo	Nb	Pb	Rb	Sr	Ta	Ti	Zn	Zr	
Nivel*	1																
As	0.20	1															
Ca	-0.07	-0.04	1														
Co	0.28	0.11	-0.20	1													
Cu	0.05	-0.06	-0.11	0.50	1												
Fe	-0.13	0.21	0.15	0.26	0.06	1											
K	0.19	-0.11	0.62	0.32	0.09	0.21	1										
Mn	0.53	0.30	0.22	0.24	-0.14	0.48	0.37	1									
Mo	0.15	0.04	0.39	0.14	0.22	0.19	0.39	0.23	1								
Nb	0.06	-0.04	0.06	0.03	0.44	0.11	0.10	0.13	0.12	1							
Pb	-0.06	-0.57	0.05	-0.07	0.15	-0.25	0.07	-0.14	-0.05	0.15	1						
Rb	-0.36	-0.25	0.32	0.06	0.36	0.11	0.44	-0.10	0.24	0.27	-0.04	1					
Sr	0.01	-0.12	0.30	-0.17	0.48	0.04	0.02	-0.03	0.28	0.25	0.18	0.07	1				
Ta	0.01	0.09	0.01	0.38	-0.02	0.20	0.28	0.09	-0.18	-0.25	-0.05	0.08	-0.17	1			
Ti	0.27	-0.17	0.39	-0.04	0.05	-0.09	0.34	0.22	0.43	0.22	0.20	0.13	0.26	-0.21	1		
Zn	0.14	0.05	0.53	0.11	0.46	0.25	0.40	0.37	0.31	0.21	-0.02	0.07	0.32	-0.09	0.19	1	
Zr	0.10	0.00	0.30	0.03	0.02	0.19	0.21	0.22	0.29	0.37	-0.12	0.01	0.29	-0.17	0.25	0.22	1

4.3.2 ANÁLISIS DE SECCIONES PULIDAS MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Como ya hemos comentado, tres secciones pulidas fueron elaboradas a partir de muestras extraídas de la zona inferior, media y superior en la columna. Sobre cada una de ellas se llevó a cabo su análisis morfológico y composicional mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), acoplada a un sistema de espectrometría de dispersión energética de rayos-X (EDX).

4.3.2.1 ZONA SUPERIOR DE LA COLUMNA

En la zona superior de la columna se identifican, de forma clara, granos primarios parcial o totalmente cementados por una costra de composición rica en Fe (*hardpans*), constituida por oxi-hidróxidos de hierro. En la Figura 3.18 (A y B), se observa como esta fase secundaria (gris

claro), envuelve a los granos primarios (gris oscuro), rellenando el espacio intergranular original. El espectro de dispersión de rayos-X (Figura 3.18-C), realizado sobre la fase mineral envolvente, muestra claramente la predominancia del Fe y el Mn en su composición. Ello es típico de este tipo de costras de oxidación (Alakangas y Öhlander, 2006).

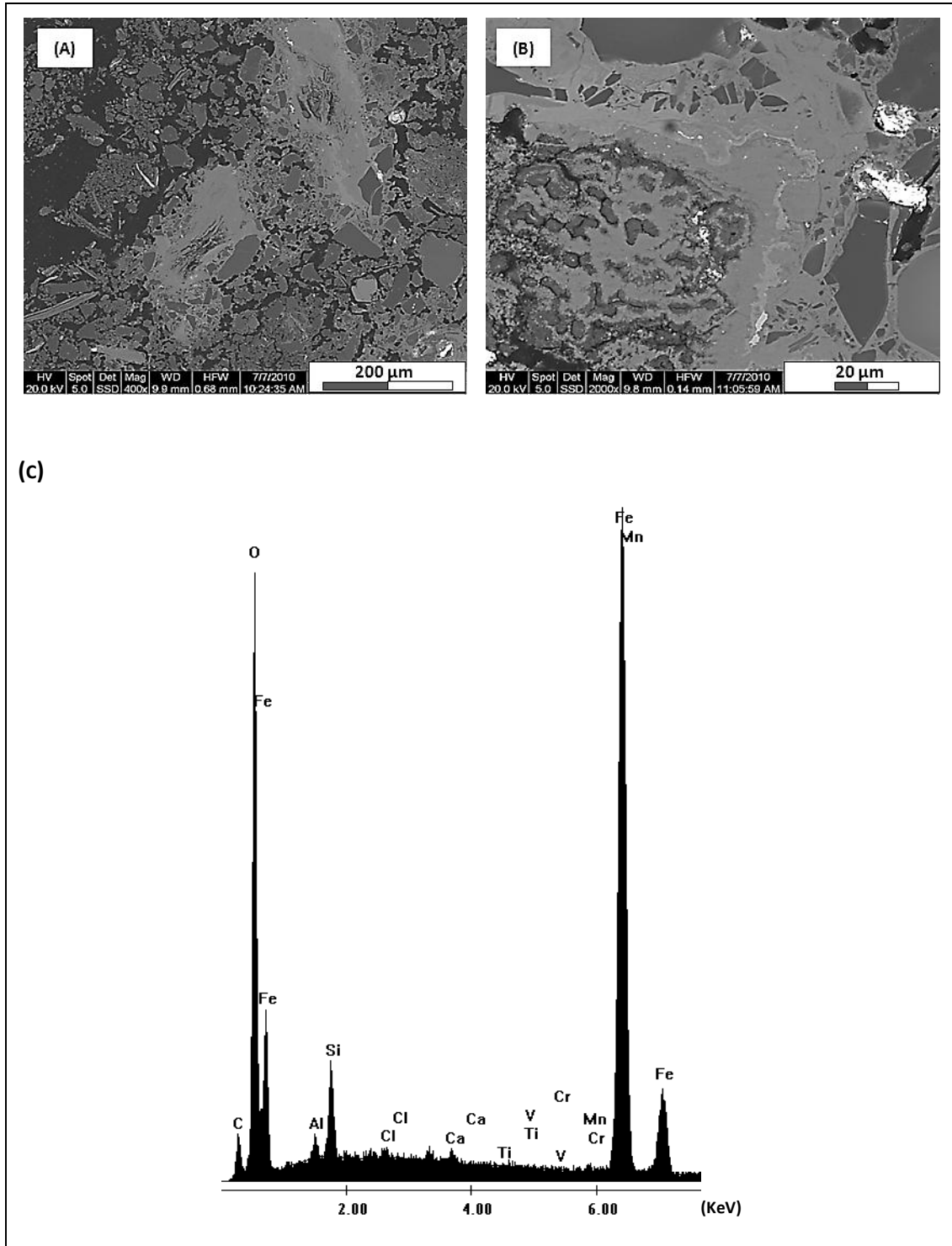


Figura 3.18. Formación de costras de oxihidroxidos de hierro (hardpans) en la zona superior de la columna de serrines de granito (SEM-EDX). (A) y (B), imágenes SEM de hardpans a distintos aumentos (400x y 2000x); (C) Espectro de dispersión de rayos-X correspondiente al material formado en la zona cementada.

La formación de hardpans en la zona superior de la columna está relacionada con las reacciones de oxidación de los granos de granalla de acero en la superficie de contacto suelo-atmósfera. Esta interfaz resulta propicia para la precipitación de fases minerales a partir de los fluidos intersticiales que ascienden a través de la columna por fuerzas capilares y la oxidación de granos primarios. La alta movilidad del Fe y el Mn observada en el agua de la columna, tal y como se analizó en el apartado 4.2.1.2, permite la migración de estos elementos hacia zonas de interfaz serrines/atmósfera, contribuyendo con la formación de hardpans.

La Figura 3.19 muestra en detalle el fenómeno de la oxidación. Sobre la imagen se puede distinguir un grano de granalla sometido a procesos de oxidación desde los bordes hacia la zona central del mismo. En este caso, la oxidación se encuentra en una fase más temprana que la apreciada en la Figura 3.18.

En términos geoquímicos, la presencia de oxi-hidróxidos de Fe entre la mineralogía de los serrines de granito favorece la atenuación de la eventual contaminación por metales además de ejercer un papel de mejora de la calidad de aguas cuando éstas incorporen contaminantes susceptibles de reducción electroquímica (Vázquez, 2005).

Desde el punto de vista físico-mecánico, la reducción del espaciado intergranular (porosidad) asociado a la formación de hardpans, se refleja en un descenso de la permeabilidad del material y refuerza la fábrica original con esqueleto mineral que mejora su resistencia debido a su mayor cohesión y alta rugosidad superficial.

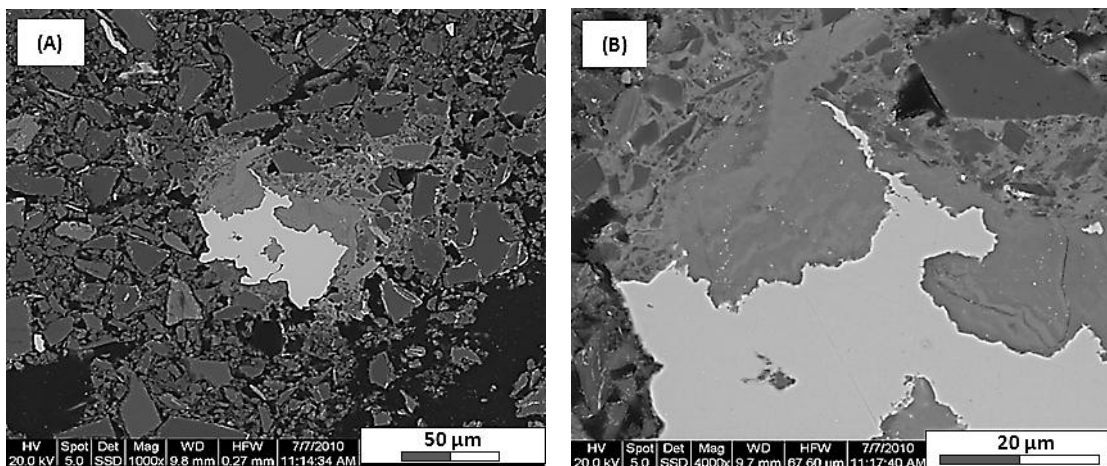


Figura 3.19. Hardpans en formación en la zona superior de la columna. Las imágenes muestran un halo de oxidación entorno a un núcleo de hierro sin oxidar, a distintos aumentos (A, B).

4.3.2.2 ZONA MEDIA DE LA COLUMNA

La sección pulida que representa a la zona media de la columna de serrines, no muestra marcas de oxidación. Esta parte no ha estado en contacto directo con el aire, quedando las fases minerales férricas inalteradas. La Figura 3.20-B muestra granos de granalla de acero (gris claro), en el seno de la matriz granular original. Se pueden observar las aristas de los granos de

granalla con morfología cóncava hacia zonas externas, propia de granos primarios inalterados, contrariamente a lo observado en los granos de la Figura 3.19.

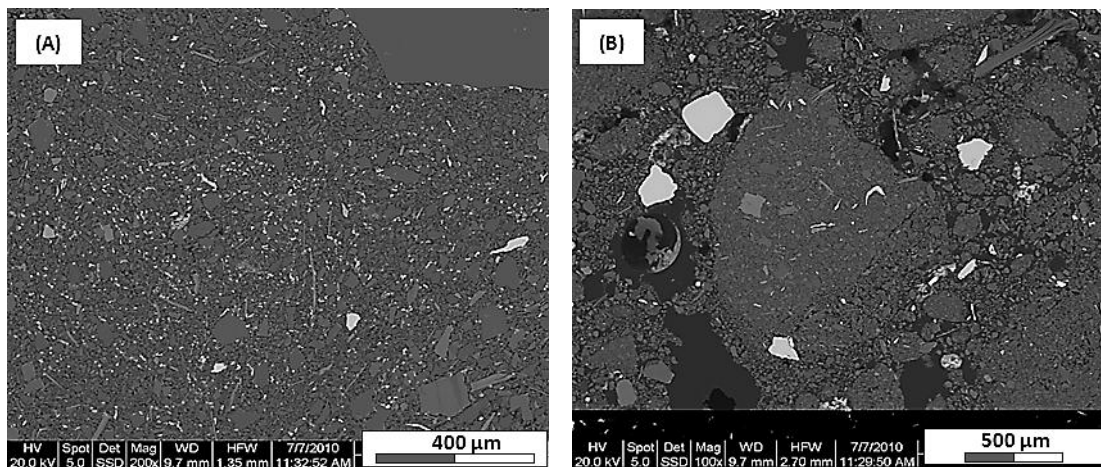


Figura 3.20. Zona central de la columna de serrines de granito. No se observa la formación de hardpans. (A) Imagen de la textura general; (B) partículas de hierro sin oxidar (granalla).

La textura de los serrines de granito, en relación con la distribución del tamaño de grano de sus partículas, es de tipo limo. Sin embargo, cuando estos suelos se han formado por la acción de procesos naturales como resultado de la meteorización de rocas primarias, difieren del de los serrines de granito en la morfología de los granos. Este fenómeno se puede observar en la Figura 3.20, donde se muestran granos inequigranulares y subidiomorfos, mientras que un suelo limoso de formación natural presentaría un mayor redondeamiento y uniformidad en los granos como consecuencia de los procesos de erosión y transporte.

4.3.2.3 ZONA INFERIOR DE LA COLUMNA

La sección pulida fabricada a partir de una muestra de serrines de la zona inferior de la columna presenta costras de precipitación secundaria en proceso de formación, con los granos originales parcialmente cementados (Figura 3.21). A diferencia de la zona media de la columna, esta zona ha estado en contacto con el aire durante la fase de envejecimiento, a través de la apertura inferior de la columna; aunque de modo más limitado que la zona superior.

En la Figura 3.21-A se observa un grano de granalla de acero con bordes parcialmente alterados, limitando con una zona superior de aspecto conglomerático formado por los granos originales (gris oscuro), parcialmente cementados (gris claro). El grano de granalla, ilustrado en detalle en la Figura 3.21-B, permite ver la huella de la oxidación sobre una de sus caras en contacto con la zona cementada.

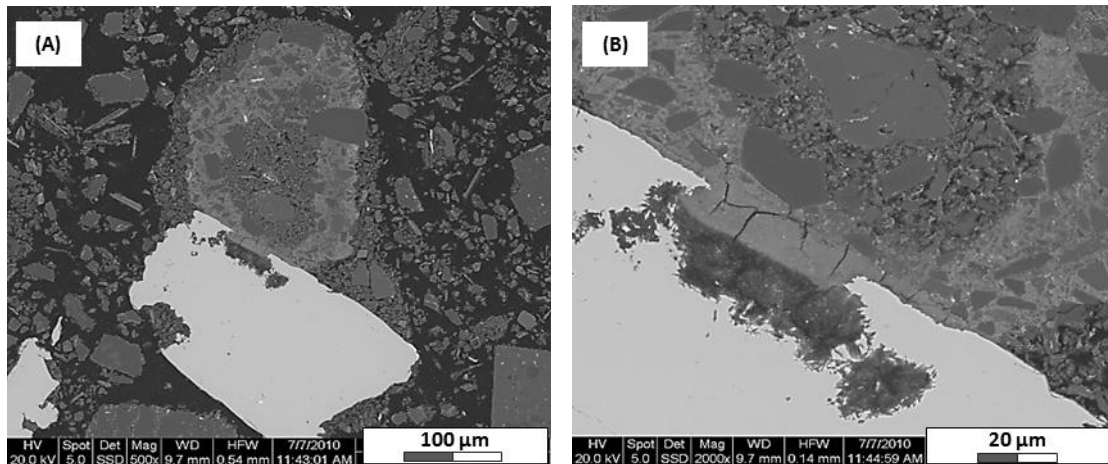


Figura 3.21. Zona inferior de la columna de serrines de granito. (A) Grano de granalla parcialmente oxidado y cementación parcial; (B) Detalle del borde de la partícula de granalla oxidado.

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El ensayo de dispositivo de columna para el análisis unidimensional del comportamiento hidrodinámico y geoquímico en materiales granulares no consolidados desarrollado con serrines de granito, ha permitido reunir una gran cantidad de datos. Los resultados alcanzados en las diferentes fases, han sido analizados, discutidos e interpretados, desde un enfoque hidrogeoquímico, hidrodinámico y/o mineralógico, según el caso.

5.1 ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO

5.1.1 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

La monitorización durante la fase de hidratación ha permitido estudiar la relación existente entre el contenido en agua presentado por los serrines y su respuesta eléctrica. Diferencias en la conductividad eléctrica del material para un grado de saturación similar, sugieren fenómenos de disolución y transporte en la dirección y sentido del flujo, repercutiendo en un enriquecimiento iónico a favor del movimiento y creciente con la distancia recorrida por el agua a través de los serrines. Este fenómeno es corroborado por el análisis del agua intersticial del material.

Diversas aproximaciones empíricas llevadas a cabo con serrines de granito han permitido determinar la conductividad eléctrica del agua intersticial a partir de datos de conductividad eléctrica del suelo y de las propiedades físicas básicas del material (p.ej. humedad, densidad, porosidad). Los resultados han demostrado buenos ajustes para la relación entre estas variables en la columna de ensayo, lo cual puede ser de gran interés en otro tipo de contextos experimentales enfocados a determinar contenidos de agua en serrines de granito, bajo control instrumental menos exhaustivo.

5.1.2 ANÁLISIS COMPOSICIONAL

El agua recolectada mediante extractores Rhizon, ha permitido llevar a cabo un análisis composicional en detalle del agua intersticial de los serrines de granito. Adicionalmente, el muestreo del agua que no permaneció en el sistema, porque lo atravesó y quedó situada en la zona libre superior (agua de rebose), o aquella situada en el depósito inferior del dispositivo de columna (agua de base), ha mostrado la existencia de tendencias particulares entre los distintos componentes disueltos a quedar retenidos en el suelo o migrar a favor del flujo.

Respecto a los valores máximos permitidos en lixiviados procedentes de residuos inertes, recogidos en la Directiva 1999/31/CEE, el agua drenable de la columna de ensayo cumple con los límites máximos establecido por la Directiva, impuestos a partir de ensayos normalizados de percolación. El cromo total del agua registrado en el agua intersticial es el único valor que sobrepasa la normativa. No obstante, este elemento se clasificó dentro del grupo con mayor afinidad por permanecer en el agua intersticial de los serrines de granito, al igual que otros metales tóxicos como el Mo, Se, Sb y Hg. Esto, a su vez, permite pensar en los serrines como un interesante filtro natural para aguas enriquecidas en este tipo de componentes.

Otros elementos de gran interés son aquellos involucrados en la formación de fases minerales de precipitación secundaria, como el hierro y el manganeso. Del análisis composicional se deduce que este tipo de elementos tienden a moverse con el flujo. Esto tiene una gran repercusión en contextos naturales donde las zonas de lixiviación se encuentren aireadas, en tanto que constituyen potenciales frentes de oxidación y precipitación mineral a partir de las soluciones acuosas procedentes de los serrines de granito.

La evaluación de la distribución composicional del agua mediante un análisis de componentes principales que permitió reducir las variables del sistema (iones) a 8 componentes factoriales. La mayoría de los iones (24) quedaron recogidos en un solo componente, reflejando una distribución coherente con la mostrada por la conductividad eléctrica del agua. Este componente está encabezado por elementos mayoritarios propios de los minerales fundamentales del granito, los cuales muestran un comportamiento similar de movimiento a favor del flujo, en su mayoría.

Dentro de los constituyentes principales analizados en el agua de la columna, aparece el bromo. Su procedencia se vincula a las inclusiones fluidas presentes en los minerales del granito original, liberadas durante los procesos industriales de corte y pulido. Los serrines quedarían enriquecidos en soluciones salinas ricas en bromo, entre otros elementos. Por lo tanto, su alta concentración convierte al bromo en trazador natural en lixiviados de serrines de granito.

5.2 ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

La monitorización de la fase de hidratación permite reconocer fenómenos de reajuste interno de la presión de poro, con evolución temporal de la franja capilar hacia un estado estacionario.

El agua procedente de zonas inferiores, más húmedas, ocupa los poros de las zonas superiores, más secas. Ello es coherente con la tendencia natural de los suelos no saturados a equilibrar la succión del sistema a partir de la homogenización del grado de saturación global del medio poroso.

Cuando la columna alcanza un determinado grado de saturación, el material pierde su capacidad de retención. A partir de este momento, el material se satura parcialmente hasta un valor máximo marcado por su porosidad efectiva, que en el caso de la columna de ensayo constituye el 91% de la porosidad total (porosidad ~ 0.53).

El reconocimiento de las propiedades físicas del material en detalle, ha permitido determinar la curva de conductividad hidráulica no saturada de los serrines de granito bajo las condiciones de ensayo mediante un novedoso método experimental: empleando los Rhizon como análogos a pozos de drenaje. A partir de la conductividad hidráulica saturada estimada, la cual presenta valores elevados debido a que los serrines del ensayo no se encuentran consolidados en este ensayo, se ajustaron curvas exponenciales $K - S_w$, validadas de modo satisfactorio mediante el modelo tradicional MVG. Este tipo de curvas permite determinar el valor de la conductividad hidráulica presentado por los serrines según su grado de saturación, a partir de la observación de la curva de caudal generada durante el llenado de las jeringas acopladas al Rhizon. La pérdida de la linealidad inicial en las curvas de caudal, relacionada con la oposición del agua intersticial a la succión impuesta desde el exterior, marcan la capacidad de campo del material a las condiciones de ensayo ($S_w \sim 0.7$; $\theta \sim 0.4$).

5.3 ANÁLISIS MINERALÓGICO

El análisis textural y composicional llevado a cabo sobre las secciones pulidas fabricadas a partir de muestras de serrines de granito, ha permitido identificar la formación de costras de oxidación (hardpans) en zonas donde el material se encontró en contacto directo con la atmósfera. Estas mineralizaciones, producto de la oxidación de la granalla añadida a los serrines durante los procesos industriales de corte y pulido de los bloques primarios, actúan de forma cementante sobre los granos del suelo. La principal consecuencia de esta cementación es la reducción parcial de la porosidad del material, lo cual se traduce en un descenso de la permeabilidad en la zona afectada.

Se ha podido observar cómo la precipitación de hardpans ha quedado limitada a las zonas aireadas de la columna de ensayo, mientras que las zonas internas no presentan este tipo de encostramiento. La zona inferior, cuya aireación estaba limitada, mostraba oxidaciones en una fase poco avanzada. Uno de los principales problemas propuestos en relación a la modificación de la fábrica original de los serrines, es el aumento diferencial de volumen interno por precipitación de oxi-hidróxidos de hierro. La identificación de costras únicamente en zonas aireadas, constata la poca importancia de este fenómeno, que quedaría restringido a las zonas más superficiales. En ellas se produciría una disminución de la porosidad superficial, lo cual limitaría la infiltración de agua y mejoraría la resistencia a la erosión.

A su vez, los oxi-hidróxidos de hierro son eficaces secuestradores de metales y otros contaminantes. Esto, junto a la afinidad que mostraron tener determinados contaminantes como el Cr, Mo o Hg, por permanecer en el agua intersticial de los serrines de granito, permite pensar en el uso de este material como barrera natural para mejora de la calidad de aguas.

La fábrica observada en las secciones pulidas, analizadas en detalle, refleja una distribución inequigranular y granos subidiomorfos. Los serrines de granito representan un material joven, en términos geológicos. La morfología de sus granos obedece a la abrasión inducida en los procesos de manufactura, que resulta en formas angulosas. A pesar de que, texturalmente, se considera un suelo tipo limo, su fábrica difiere de otros materiales con textura similar formados bajo procesos naturales de erosión y transporte, los cuales se caracterizan por la morfología redondeada de sus granos y la alta uniformidad de su distribución granular. Esto se refleja en el valor de superficie específica BET presentado por los serrines ($\sim 8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$), muy inferior a la que observaríamos en materiales naturales de igual tamaño de grano.

Este aspecto puede repercutir en determinadas propiedades hidráulicas de los serrines de granito respecto a las presentadas por otros materiales de características texturales similares, como es el caso de la conductividad hidráulica o la capacidad de retención.

CAPÍTULO

4

MODELOS EXPERIMENTALES DE FLUJO EN SERRINES DE GRANITO NO SATURADOS

1 Introducción	69
2 Instrumentación	70
2.1 Columna con Sensores de Humedad y Succión	71
2.2 Tanque de Electrodo	75
3 Materiales y Métodos	76
3.1 Construcción de los Ensayos	77
3.2 Seguimiento y Procesado de los Datos	79
3.3 Modelización. El Código COMPASS	83
4 Resultados	84
4.1 Cilindro de Metacrilato. ENSAYO 1.	84
4.2 Cilindro de Metacrilato: ENSAYO 2.	95
4.3 Tanque de electrodos: ENSAYO 3	105
5 Discusión de Resultados	111
5.1 Aplicabilidad de las Distintas Técnicas de Caracterización	111
5.2 Parámetros Hidráulicos en Serrines de Granito	113
5.3 Repercusión del Lavado de Serrines de Granito en el Material de Contorno	114

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analiza el comportamiento hidrodinámico de los serrines de granito, empleando dispositivos experimentales instrumentados para observar el flujo a través de medios porosos. De modo resumido, capas apiladas de serrines de granito parcialmente saturadas fueron introducidas en los dispositivos donde, tras ser compactadas y muestreadas, fueron sometidas a hidratación empleando sistemas de riego controlado. El seguimiento del avance del frente de saturación a través del material se abordó mediante aproximaciones intrusivas y no intrusivas, dependiendo del ensayo. En cada caso, la instrumentación empleada permite llevar a cabo un seguimiento del comportamiento de los serrines en respuesta a las condiciones hídricas simuladas.

Para los ensayos con caracterización basada en técnicas intrusivas hemos empleado un cilindro de metacrilato de 0.5 m de altura y 0.05 m³ de capacidad. El cilindro fue equipado con sensores de humedad y succión. La robustez y transparencia, así como su escasa deformabilidad, hacen del metacrilato un material adecuado para este tipo de ensayos a pequeña escala. Durante la construcción, los serrines de granito fueron introducidos en el cilindro por tongadas, las cuales fueron compactadas empleando una maza próctor, aplicando una energía equivalente a la de un ensayo próctor modificado (UNE-EN 103501-1994). Tras compactar cada capa, tomamos muestras para la determinación de las propiedades físicas básicas del material, requisito para la definición de las condiciones iniciales del ensayo.

Durante el emplazamiento de los serrines, a cotas previamente prescritas, se ubicaron sondas de capacitancia y psicrómetros en el seno del material. Estos sensores permiten registrar en tiempo real el avance del agua a través de la columna de serrines, en respuesta a los procesos de hidratación aplicados desde la zona superior. El agua aportada se infiltra y avanza a través del material hasta alcanzar los puntos más bajos de la columna, en donde un sistema de colectores permite cuantificar el volumen circulado en función del tiempo y facilita el almacenamiento para su posterior análisis.

El dispositivo experimental introduce interferencias (relacionadas con el carácter intrusivo de los sensores) y está limitado por el carácter de medida puntual de los sensores empleados, lo cual puede no ser suficientemente representativo del comportamiento del sistema.

La importancia de tales efectos ha sido abordado a través de un segundo experimento en el que se ha empleado un sistema de electrodos para el análisis de la conductividad eléctrica en suelos. Los métodos geoelectrónicos constituyen una técnica de análisis indirecto de las propiedades físicas de los medios porosos. Tienen carácter no intrusivo y poseen, en general, alta resolución espacial.

El estudio de los serrines empleando técnicas geoelectrónicas se llevó a cabo en el BGR de Hanover (Alemania), donde se ejecutó un ensayo de hidratación controlada sobre una columna de serrines de granito no saturados.

En este caso, el dispositivo experimental era un cilindro de PVC de dimensiones similares a las del recinto de metacrilato, permitiendo reproducir el procedimiento constructivo anteriormente descrito. El recinto se equipó con un sistema de electrodos hincados 2 cm en el material desde los contornos del cilindro. El procesado de los datos eléctricos permitió evaluar tridimensionalmente el grado de saturación de la columna de serrines, en distintos momentos de ejecución del ensayo de hidratación.

El tratamiento e interpretación de los datos experimentales sirvió, además, para la determinación de los parámetros hidráulicos de interés de los serrines de granito, en especial la conductividad hidráulica y la capacidad de campo. Ambos son relevantes a la hora de poner en evidencia la viabilidad del uso de los serrines de granito como material para la construcción de barreras de impermeabilización y/o sellado.

Con carácter específico, los objetivos particulares de esta serie de experimentos fueron:

- ◆ Desarrollar modelos experimentales para el estudio de hidrodinámico de materiales granulares, dotándolos de técnicas de muestreo que permitan estudiar e interpretar el comportamiento del sistema agua-suelo a través de un registro de datos continuo.
- ◆ Evaluar la aplicabilidad de las técnicas de caracterización empleadas, analizando la fiabilidad y representatividad de las observaciones.
- ◆ Estudiar el comportamiento hidrodinámico de los serrines de granito compactados, bajo condiciones de hidratación controladas, profundizando en el conocimiento de su capacidad de retención y conductividad hidráulica.
- ◆ Identificar eventuales minerales neoformados, asociados a los procesos fisicoquímicos que operan en la columna mientras dura el ensayo. Asimismo, evaluar la repercusión de esos procesos desde el punto de vista del comportamiento hidrodinámico del sistema.

2 INSTRUMENTACIÓN

Como ya comentamos en la introducción, hemos empleado dos dispositivos experimentales para el estudio del comportamiento de los serrines de granito compactados, no saturados, al ser sometidos a una hidratación controlada. Ambos dispositivos son cilíndricos y cuentan con dimensiones similares, con un volumen útil de $\sim 0.05 \text{ m}^3$. La principal diferencia entre ambos radica en la naturaleza de los sensores empleados y el muestreo realizado.

Consideramos que una técnica de muestreo es intrusiva cuando el dispositivo de medida se encuentra alojado en el medio estudiado. Ello altera el medio y puede dar lugar, en el caso del flujo, a trayectorias preferentes. Por el contrario, cuando los sensores permiten la observación

indirecta del medio y de los procesos que en él suceden, sin penetrarlo, lo consideramos una aproximación no intrusiva. A continuación, describimos las características más relevantes de ambas configuraciones experimentales.

2.1 COLUMNA CON SENSORES DE HUMEDAD Y SUCCIÓN

El dispositivo consiste en un recipiente cilíndrico de 0.5x0.35 m (altura x diámetro), dentro del cual se emplazan sensores de humedad y succión a cotas prescritas (Figura 4.1). El recinto de confinamiento es un cilindro de metacrilato [1] cuya base cerrada y abierto en su parte superior. El material se vierte y compacta en tongadas en su interior [2]. El metacrilato, además de ser transparente (condición idónea para el seguimiento óptico de los procesos internos), es lo bastante resistente como para soportar las tensiones inducidas por el proceso de compactación, lo cual hacen de éste un material idóneo para ensayos de la entidad presentada.

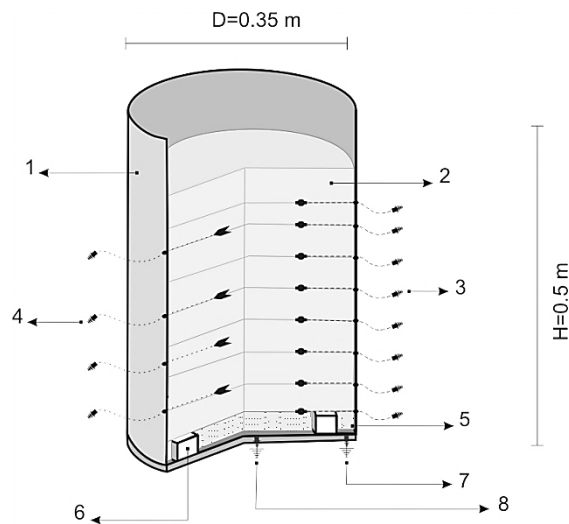


Figura 4.1. Columna de metacrilato con sensores de humedad y succión. [1] Recinto de confinamiento; [2] Capas de material compactado (ocho, en este caso); [3] Psicrómetros; [4] Sondas de capacitancia; [5] Capa drenante; [6] Anillo separador de regiones de lixiviación; [7] Colector para lixiviados perimetrales; [8] Colector para lixiviados centrales. [H] y [D], dimensiones del cilindro (altura y diámetro, respectivamente).

A través de vías de acceso perforadas en la superficie lateral del cilindro, se insertaron los sensores de humedad [4] y succión en suelos [3] (sondas de capacitancia y psicrómetros, respectivamente), a cotas prescritas durante el diseño del ensayo. Se procuró que dichas cotas coincidieran con los límites entre tongadas compactadas, con el fin de mantener un buen control geométrico de la posición de los sensores y evitar daños por desplazamiento durante el montaje del experimento.

Una división realizada en la base del recinto con un anillo separador [6], permitió separar los lixiviados centrales [8] de los laterales [7], potencialmente afectados por el flujo preferente de agua en la interfaz serrines/metacrilato. En la base del cilindro, se dispuso una cama de grava

[5] que facilitara el drenaje del agua al tiempo que regularizaba la superficie sobre la que se vertieron los serrines.

Para la hidratación de la columna se empleó un sistema de riego por nebulización *Aqualife Nebusystem* (no ilustrado en la Figura 4.1) diseñado por *Samarketing S.L.* Este sistema minimiza el efecto erosivo del agua vertida sobre la superficie del material. El riego se lleva a cabo desde un depósito de agua ubicado en el laboratorio de experimentación (CITEEC), estableciéndose un control de la cantidad vertida en función del caudal máximo aportado por el sistema nebulizador (calibrado antes y durante el transcurso del ensayo) y el tiempo del vertido.

Como medida de control complementario, se dispuso un evaporímetro artesanal contiguo al dispositivo experimental, a partir del cual se evaluó la tasa de evaporación en el recinto, que completa los balances hídricos simulados.

A continuación se describen con mayor detalle las características de los sensores empleados en el seguimiento del avance del flujo a través de la columna: sondas de capacitancia y psicrómetros.

◆ **SONDAS DE CAPACITANCIA**

La medida de la capacitancia se basa en un método electromagnético que permite evaluar la humedad en suelos. Fue introducido en los años 30 del siglo XX y rápidamente desarrollado. Los avances en microelectrónica, permitieron un importante desarrollo de esta técnica durante la década de los 90' (Starr y Paltineanu, 2002).

Inicialmente, la técnica se empleaba para detectar anomalías en las líneas de transmisión eléctrica y para estudiar la respuesta del campo eléctrico propio de los constituyentes del suelo. La influencia de la humedad en las propiedades eléctricas del suelo propició el avance del uso de la técnica en este tipo de estudios.

El parámetro físico con el que se expresa la afinidad de los materiales a ser polarizados cuando son expuestos a la influencia de un campo eléctrico es la permitividad. La permitividad del medio es un número complejo en el que la parte real representa la energía almacenada y la parte imaginaria la energía absorbida por el material. La parte real se conoce como constante dieléctrica del medio y proporciona una estimación del contenido en agua del mismo (Ritter y Regalado, 2007).

En la práctica, la permitividad se expresa en términos de permitividad relativa de la sustancia respecto a la del vacío (carácter adimensional). La determinación del contenido en agua de un suelo puede llevarse a cabo gracias al fuerte contraste entre la permitividad relativa del agua (~ 80) y la de los minerales constituyentes de la matriz de los suelos (entre 4 y 10). No obstante, la relación permitividad-humedad es función de cada tipo de suelo y de las características de la sonda empleada.

En base a esta consideración, hemos desarrollado un ejercicio de calibración de sondas de capacitancia para su uso específico con serrines de granito. Las sondas empleadas en nuestro trabajo han sido *ECHO EC-5 (Decagon Devices, Inc.)*. La calibración se desarrolló sobre muestras de serrines compactadas bajo condiciones próctor normal, variando su contenido en agua. Las circunstancias y resultados de la calibración se presentan en el Anexo I.C.

La sonda ECHO EC-5 consiste en un sensor de dos puntas que registra el contenido volumétrico en agua del material que se sitúa entre las mismas (Figura 4.2). De acuerdo con las especificaciones del fabricante, la sonda posee una resolución de $0.001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en suelos minerales, con una precisión de $\pm 2\%$ para suelos con agua intersticial cuya conductividad eléctrica sea inferior a 0.8 S m^{-1} .



Figura 4.2. Sonda de capacitancia ECHO modelo EC-5. [1] Transmisor de señal inalámbrico; [2] Sensor de humedad.

El sensor [1] está conectado a un transmisor inalámbrico de corto alcance [2] por medio de un cable. El transmisor envía los datos registrados a un receptor acoplado a PC, con un alcance máximo de 500 m.

La inserción del sensor se puede realizar en cualquier dirección, sin que esto influya en la calidad de la medida. La escasa distancia existente entre las dos puntas exige un minucioso examen de la zona de inserción, debido a que la contaminación de esta pequeña área de medición por objetos ajenos al material muestreado puede distorsionar la señal recibida.

◆ PSICRÓMETROS

Los psicrómetros de termopar son un tipo de sensor electrónico que, apoyándose en ciertos principios físicos, permite medir la presión ambiental. Su empleo en este tipo de ensayos radica en su capacidad para registrar variaciones en la succión de un suelo, relacionadas estas con las variaciones de su contenido en agua.

La relación termodinámica entre la humedad relativa y la succión, queda definida a través de la ecuación de Kelvin:

$$\Psi = \frac{RT\rho_w}{M_w} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad \text{e.4.1.}$$

donde Ψ representa la succión total (Pa), R la constante universal de los gases ($8.31432 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T la temperatura (K), ρ_w la densidad del agua a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y M_w la masa molecular del agua ($18.0152 \text{ g mol}^{-1}$). El cociente $\frac{P}{P_0}$ representa la humedad relativa, como relación entre la presión de vapor de agua en el suelo (P) y en el aire saturado en ese mismo gas (P_0), a una temperatura T (Vázquez, 2005).

Un psicrómetro de termopar es una aplicación del efecto Peltier en la determinación del contenido de humedad, en este caso, en un suelo. El efecto Peltier puede ser descrito de la siguiente forma: al hacer circular una corriente eléctrica a través de un termopar (unión bimetálica) en una dirección, se produce un calentamiento diferencial (uno se calienta y el otro se enfría), de tal manera que, si la dirección de la corriente se invierte, se produce un efecto contrario.

El psicrómetro de termopar funciona de la siguiente manera: por medio de la inducción de una pequeña diferencia de potencial, la temperatura del termopar se reduce hasta el punto de rocío (efecto Peltier), de tal manera que el vapor de agua de la atmósfera próxima al termopar se condensa en la unión metálica. En ese momento se interrumpe la corriente, midiéndose la temperatura de la unión metálica a partir de un microvoltímetro mientras el agua de la microgota formada sobre la unión se evapora (efecto Seebeck). La temperatura de la unión bimetálica depende de la velocidad de evaporación (a mayor eveporación, mayor descenso de temperatura de la unión bimetálica) la cual, a su vez, depende de la humedad ambiental relativa. Esta se encuentra directamente relacionada con el potencial hídrico del medio (Andraski y Scanlon, 2002).

La unión bimetálica del termopar debe registrar la humedad sin entrar en contacto directo con el medio. Por ello, los psicrómetros están dotados de una vaina porosa metálica o cerámica (Figura 4.3), que permite el paso del vapor de agua al tiempo que evita el contacto directo con el medio.



Figura 4.3. Psicrómetro de termopar con vaina porosa de acero inoxidable PCT-55-15-SF (Wescor Inc.)

Las lecturas de los registros psicrométricos consisten en voltajes. Su magnitud está relacionada con la evaporación del agua en la unión bimetálica. Esto, a su vez, lo está con la succión del suelo.

En el experimento con la columna de metacrilato empleamos 8 psicrómetros *PCT-55-15-SF* (*Wescor Inc.*), conectados al datalogger *PSYPRO Water Potencial System*. En lo referente a los datos técnicos reportados por el fabricante, es destacable el hecho de que el máximo grado de enfriamiento alcanzable por el psicrómetro es $0,6^{\circ}\text{C}$ por debajo de la temperatura ambiente. Esto limita la lectura de la succión máxima del psicrómetro a -8 MPa (Barrera *et al.*, 2004). El rango de registro se sitúa, por tanto, entre -8 y -0.05 MPa, con una precisión de ± 0.03 MPa. El sensor posee un certificado de calibración emitido por el fabricante que garantiza su correcto funcionamiento.

2.2 TANQUE DE ELECTRODOS

El tanque de electrodos (Figura 4.4) fue diseñado a partir de un cilindro de PVC [2] de 0.75 m de altura y 0.3 m de diámetro, sobre el cual se implantan radialmente 5 anillos de 16 electrodos de acero inoxidable [3]. Los electrodos penetran de forma lateral en el material de ensayo hasta ~ 2 cm. Estos se comportan como transmisores del impulso eléctrico inducido a partir del sistema *SIPLab* (Spectral Induced Polarization, Radic Research, Berlin) [1], a través de cables conectores [4], y como receptores de la respuesta del medio.

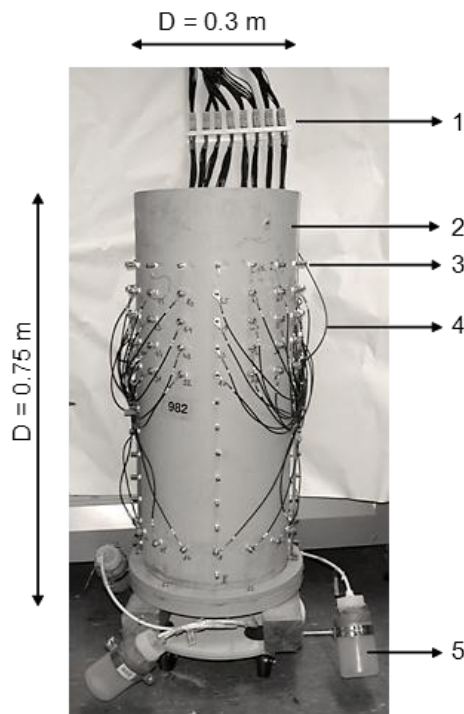


Figura 4.4. Tanque de electrodos. [1] Conector a herramienta *SIPLab*; [2] Recinto de confinamiento de PVC; [3] Electrodos; [4] Cables de conexión a electrodos; [5] Recogida de lixiviados; [D] y [H] representan el diámetro y la altura total del dispositivo, respectivamente.

Previamente a la hincada lateral de electrodos, el material de ensayo (serrines de granito parcialmente saturados) se introdujo en el dispositivo en tongadas que fueron compactadas mediante una maza próctor, bajo condiciones de próctor modificado (UNE-EN 103501-1994). Cada una de las capas fue muestreada en términos de humedad y densidad, como requisito básico para la determinación de las condiciones iniciales de ensayo.

El riego del material se desarrolló de forma manual, empleando volúmenes definidos de agua destilada vertida sobre la columna de serrines mediante una regadera dotada de un mecanismo aspersor regulable, que permitía minimizar el efecto erosivo del agua sobre la superficie del suelo.

Del mismo modo que el dispositivo descrito en el apartado 2.1, la base del dispositivo se diseñó con diversos canales para la recogida selectiva de lixiviados perimetrales y centrales [5].

◆ SIPLAB

SIPLab es una herramienta desarrollada para llevar a cabo mediciones en el dominio de frecuencia compleja de resistividad en sedimentos y rocas (Kiberu, 2002). El instrumento, dotado de software para configurar las mediciones y sistema de adquisición de datos, está optimizado para medidas multielectrónicas en laboratorio, programables para ser repetidas de forma automática en diferentes intervalos de tiempo.

El rango de frecuencia utilizado por el instrumento se encuentra comprendido entre 1 mHz y 12 kHz, con una fuente de voltaje de ± 10 V, e intensidad de ± 10 mA. Esta herramienta está capacitada para emplear tanto el método de frecuencia variable, que se aplica para medir variaciones de la resistividad eléctrica bajo cambios de frecuencia, como el método de corriente directa para medida de resistividades en el dominio de tiempo.

El sistema de electrodos se programó en configuración dipolo-dipolo (Seidel y Lange, 2007), permitiendo realizar, de modo secuencial, 320 mediciones de la conductividad eléctrica en el seno del material, que corresponden a un ciclo completo de medidas en la columna. La duración de cada ciclo es de una hora, aproximadamente.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrollaron tres ensayos de hidratación controlada sobre serrines de granito: dos empleando el cilindro de metacrilato y otro con el tanque de electrodos.

El punto de partida para cada uno de los ensayos fue la deshidratación del material original, el cual se obtuvo directamente de una de las principales elaboradoras de piedra natural de la provincia de Pontevedra. Su humedad inicial era alta ($\sim 36\%$), motivo por el cual antes de ser empleado en el ensayo se sometió a un secado mediante estufa en condiciones normalizadas

(UNE-EN 103300-1993). Tras la deshidratación, el material fue disgregado, tamizado (<0.16 mm) y homogenizado.

Los serrines de granito secos, fueron amasados con agua, cambiando la proporción agua-suelo en cada uno de los ensayos. La mezcla fue vertida en el interior de los dispositivos experimentales por tongadas, cada una de las cuales fue compactada manualmente empleando una maza próctor modificado a razón de 100 impactos por capa. Al final de la compactación de cada capa, se tomaron muestras para la determinación de las propiedades físicas básicas del material. Con ellas se establecieron las condiciones iniciales de ensayo.

Tras la construcción, comienza la ejecución de los ensayos. Estos procedieron por etapas o escalones de riego controlado, desde la zona superior de las columnas. La cantidad de agua vertida en el sistema, la tasa de evaporación estimada y los lixiviados recogidos, permitieron realizar un balance hídrico global en cada uno de los casos. Además, las condiciones iniciales determinadas durante la construcción de los ensayos, combinadas con la información del balance hídrico, permitieron aproximar la evolución del grado de saturación medio de la columna. Estos datos son susceptibles de comparación con aquellos de carácter puntual asociados a los sensores de medida.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los serrines, parcialmente hidratados, se vertieron en los cilindros experimentales por tongadas de masa conocida. El material fue sometido a un proceso de compactación por impacto, hasta completar 8 capas en el caso de los ensayos experimentales en los cilindros de metacrilato y 4 en el ensayo desarrollado en el tanque de electrodos. En todos los casos, la compactación de cada una de las capas se llevó a cabo empleando una maza próctor modificado (UNE-EN 103501-1994) a razón de 75 golpes por capa. Cada una de ellas fue alisada, superponiendo sobre la misma una superficie plana y rígida de PVC, de 1 cm de espesor y área igual a la del recinto experimental. Sobre esta superficie se aplicó una última secuencia de compactación de 25 impactos.

Tras el proceso de compactación/alisado, se determinó el volumen ocupado por cada capa a partir de la expresión matemática que define el volumen del cilindro que la contiene. A continuación, se extrajeron varias muestras para determinación de la humedad de la capa mediante secado en estufa bajo condiciones normalizadas (UNE-EN 103300-1993).

Conociendo el contenido de humedad y el volumen, sabida la densidad de las partículas sólidas de los serrines de granito (Barrientos *et al.*, 2010), se determinó el resto de propiedades físicas básicas asociadas a cada capa (ver Anexo I, Figura A .1). Con esto se establecieron las condiciones iniciales para cada uno de los ensayos (Tabla 4.1).

El emplazamiento de los sensores en los ensayos con cilindros de metacrilato se realizó coordinadamente con la compactación de las capas. Los sensores (4 sondas de capacitancia y 8 psicrómetros) se situaron a distintas cotas teniendo en cuenta el espesor de cada capa.

Tabla 4.1. Condiciones iniciales de ensayo. Propiedades físicas de las capas de serrines de granito compactadas durante la puesta en obra de los ensayos de flujo en serrines de granito no saturados.

	P (cm)	M (kg)	ρ_d (g cm ⁻³)	e (cm ³ cm ⁻³)	ϕ (cm ³ cm ⁻³)	θ (cm ³ cm ⁻³)	S_w	Sensores
<u>ENSAYO-1</u>								
Capa 8	4.5	6.23	1.26	1.53	0.61	0.18	0.29	
Capa 7	5	6.93	1.27	1.51	0.6	0.17	0.29	P_s
Capa 6	4	5.23	1.23	1.59	0.61	0.13	0.21	P_s
Capa 5	5	6.93	1.25	1.55	0.61	0.19	0.3	P_s EC
Capa 4	4.5	5.76	1.16	1.75	0.64	0.17	0.27	P_s EC
Capa 3	5	6.64	1.21	1.64	0.62	0.17	0.28	P_s EC
Capa 2	6.5	8.57	1.2	1.66	0.62	0.17	0.28	P_s EC
Capa 1	4	4.93	1.11	1.87	0.65	0.17	0.25	P_s
Capa 0	--	--	--	--	--	--	--	P_s
<i>Total columna*</i>	38.5	51.21	1.21	1.64	0.62	0.17	0.27	
<u>ENSAYO-2</u>								
Capa 8	6	11.89	1.63	0.96	0.49	0.43	0.87	
Capa 7	4	7.27	1.5	1.13	0.53	0.39	0.74	P_s
Capa 6	3.5	6.84	1.61	0.98	0.50	0.42	0.84	P_s EC
Capa 5	3.5	6.16	1.47	1.17	0.54	0.36	0.66	P_s
Capa 4	4.5	8.66	1.58	1.02	0.50	0.42	0.84	P_s EC
Capa 3	4	6.89	1.41	1.26	0.56	0.38	0.68	P_s EC
Capa 2	5.5	10.58	1.59	1.01	0.50	0.41	0.82	P_s
Capa 1	6	10.56	1.46	1.18	0.54	0.37	0.67	P_s EC
Capa 0	--	--	--	--	--	--	--	P_s
<i>Total columna*</i>	37	68.86	1.53	1.09	0.52	0.40	0.77	
<u>ENSAYO-3</u>								
Capa 4	14	21.96	1.37	1.33	0.57	0.26	0.46	
Capa 3	10	15.78	1.37	1.33	0.57	0.27	0.47	
Capa 2	14	21.01	1.3	1.45	0.59	0.26	0.44	
Capa 1	8	13.24	1.44	1.22	0.55	0.28	0.51	
Capa 0	--	--	--	--	--	--	--	
<i>Total columna*</i>	46	71.99	1.37	1.33	0.57	0.27	0.47	

* P , espesor de la capa; M , masa; ρ_d , densidad seca; e , índice de huecos; ϕ , la porosidad; θ , contenido volumétrico en agua; S_w , grado de saturación; (--), sin datos, capa de grava drenante; P_s , psicrómetro (PCT-55-15-SF); EC , sensor de humedad (ECHO EC-5).

*Ensayo-1, Ensayo-2: columnas de metacrilato con sensores de humedad y succión.

*Ensayo-3: tanque de electrodos.

*Total columna: P y M , valores globales; ρ_d , e , ϕ , θ , y S_w , valor promedio de las capas de serrines de granito.

En el caso del tanque de electrodos, estos fueron hincados en el material de forma perimetral, una vez finalizados los procesos de llenado y compactado del ensayo. El posicionamiento de los electrodos quedó impuesto por los orificios perforados en la superficie lateral del cilindro, de acuerdo con la disposición geométrica programada para la aplicación de SIPLab en este tipo de dispositivos.

La zona superior de los dispositivos experimentales fue equipada con sistemas de riego de escaso carácter erosivo. Mientras que en el caso de los cilindros de metacrilato se dispuso un sistema de riego por nebulización, donde el agua vertida es micronizada por el nebulizador para un tamaño de gota de $\sim 60 \mu\text{m}$, en el tanque de electrodos se empleó un dispositivo de riego manual (regadera), con un aspersor regulable con el que se consigue igualmente el efecto deseado (baja erosión superficial).

En referencia al sistema nebulizador empleado en los ensayos con el cilindro de metacrilato, éste se encontraba acoplado a un depósito de abastecimiento del laboratorio experimental (CITEEC). La presión del agua conferida por la altura del depósito resultó suficiente para generar el riego por nebulización a caudal constante, el cual fue calibrado con cadencia semanal a fin de reconocer eventuales pérdidas de carga.

La superficie superior del cilindro experimental del metacrilato se acotó lateralmente durante los periodos de riego, con un anillo de diámetro interno abierto de 25 cm, de forma análoga a la configuración de un lisímetro. Por su parte, la capa superior del ensayo llevado a cabo en el tanque de electrodos se pulió con una ligera concavidad hacia muro, generando una depresión central que favoreció la inundación diferencial en esta región. En ambos casos, se pretendía focalizar la infiltración en la zona central de la columna, minimizando los flujos preferentes a favor de la interfaz cilindro/serrines.

3.2 SEGUIMIENTO Y PROCESADO DE LOS DATOS

Los ensayos se desarrollaron a partir de la simulación de condiciones de hidratación prescritas desde la superficie de las columnas. En el caso de las sondas de capacitancia y los psicrómetros, los datos registrados han aportado información puntual del comportamiento hidrodinámico de la columna. Por otro lado, el balance hídrico permite evaluar la variación global respecto de las condiciones iniciales de forma teórica.

El balance hídrico BH del ensayo se ha aproximado a partir de la suma del agua aportada al sistema $,P$, la evaporación total $,E$, (estimada a partir de la tasa de evaporación observada, mm d^{-1} , y el área del recinto), y la cantidad de agua lixiviada, L , recogida en los colectores:

$$BH = P - E - L \quad \text{e.4.2.}$$

Un balance BH positivo implica un aumento de humedad del material respecto de las condiciones iniciales.

◆ MEDIDA DE LA EVAPORACIÓN

Tal y como hemos comentado, la cuantificación de la tasa de evaporación se realizó, en el caso de los cilindros de metacrilato, con un evaporímetro artesanal dispuesto en el recinto experimental. En el caso del tanque de electrodos, se empleó una columna de PVC de 7 cm de diámetro y altura análoga a la del tanque, sobre la que se reprodujo, a menor escala, la construcción y el proceso de hidratación del ensayo (columna de referencia). Esta pequeña columna se situó sobre una balanza, obteniéndose un registro continuo de las variaciones de peso asociadas a la pérdida de agua por evaporación (Figura 4.5), proporcionando una curva de tasa de evaporación transferible al tanque de electrodos aplicando el factor de escala del área del dispositivo.

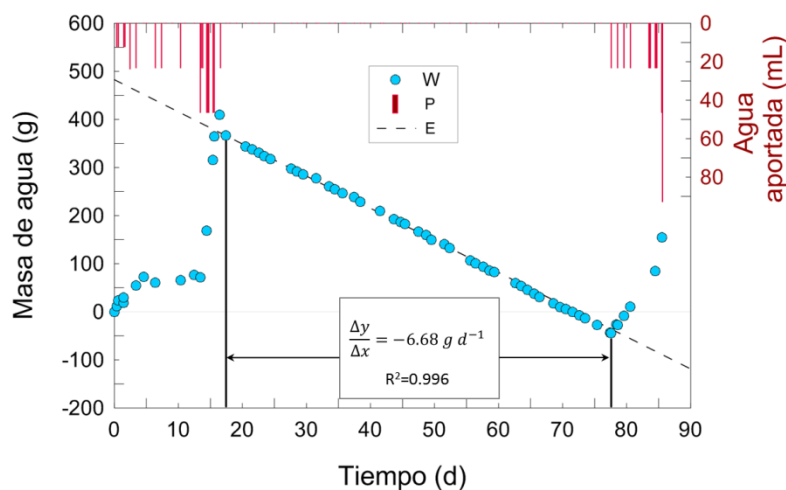


Figura 4.5. Balance de masa de agua en la columna de referencia. W , masa de agua medida en la columna; P , agua aportada; E , ajuste lineal de la tasa de evaporación para el intervalo central sin aportes; $\frac{\Delta y}{\Delta x}$, tasa de evaporación del intervalo central.

3.2.1 TRATAMIENTO DE LOS DATOS DE LOS ENSAYOS EN EL CILINDRO DE METACRILATO

Los sensores ubicados en la columna registraron la succión y el contenido volumétrico de agua de los serrines, con una frecuencia de 0.033 (sondas de capacitancia) y 0.017 Hz (psicrómetros). Los datos fueron descargados y procesados de forma distinta, según la información que aportan (humedad o succión).

◆ HUMEDAD

Los registros de las sondas de capacitancia fueron corregidos a través de la siguiente expresión:

$$\theta_P = 1.7\theta_E - 3.9(\theta_E)^2 + 5.4(\theta_E)^3 \quad \text{e.4.3.}$$

donde θ_p representa el valor corregido del contenido volumétrico en agua y θ_E el valor registrado por el sensor. Esta expresión fue obtenida durante la calibración de las sondas para su uso en serrines de granito (ver Anexo I.C).

A partir del valor corregido del contenido volumétrico en agua, puede calcularse el grado de saturación correspondiente a cada punto instrumentado a partir de la porosidad media de la capa que lo aloja (Tabla 4.1).

◆ SUCCIÓN

En la Figura 4.6 se representa la curva de retención para los serrines de granito, elaborada a partir de la expresión de Van Genuchten (1980), la cual relaciona la succión en suelos (ψ) con la humedad de la siguiente forma:

$$S_w(\psi) = S_r + (1 - S_r)[1 + (-\alpha\psi)^n]^{-m} \quad \text{e.4.4.}$$

En la ecuación e.4.4, α , n y m son parámetros empíricos de ajuste propios de cada material. En los serrines de granito sus valores son 0.193 KPa^{-1} , 0.291 y 1.41 , respectivamente (Barrientos *et al.*, 2010). Por su parte, S_r representa el grado de saturación residual, por debajo del cual el agua retenida en el suelo no actúa como fase móvil (Green y Corey, 1971).

En la Figura 4.6 se ha representado la curva de retención teórica de los serrines de granito, superponiendo el error de precisión máximo de los sensores PCT-55-15-SF (situado por su fabricante en $\pm 0.03 \text{ MPa}$).

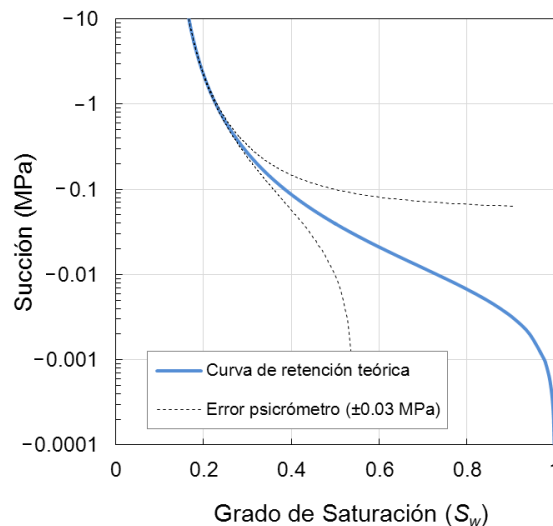


Figura 4.6. Curva de retención para los serrines de granito. Límites de precisión de los psicrómetros PCT-55-15-SF (Wescor, Inc).

Podemos observar cómo, para altas succiones (en valor absoluto), la variación en el valor del grado de saturación no es importante. Sin embargo, cuando el valor de la succión desciende

hasta -0.5 MPa, los psicrómetros no pueden ser empleados en la determinación del contenido de humedad de los serrines de granito.

Por tanto, en los experimentos realizados, los registros psicrométricos sólo se tienen en cuenta de modo aproximativo, interpretando variaciones en la succión como llegada del frente de hidratación, sin profundizar en el grado de saturación calculable a partir de la ecuación e.4.4.

3.2.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS DEL ENSAYO EN EL TANQUE DE ELECTRODOS

La herramienta SIPLab permite realizar secuencias completas de medida de la columna de ensayo en ciclos de 58 min. Durante este tiempo se efectúa un total de 320 mediciones del valor de la resistividad eléctrica del material en los puntos de localización de los electrodos, cuyas posiciones quedan prescritas por la configuración dipolo-dipolo empleada. Los valores registrados se localizan sobre el plano ortogonal al eje z , a la altura fijada por cada anillo de electrodos. En la vertical, no se realizan mediciones entre electrodos.

Los datos de resistividad eléctrica obtenidos fueron procesados mediante algoritmos de interpolación empleando la aplicación *BERT*, del paquete *DCFEMLib* (Günther *et al.*, 2006). El resultado es una malla tridimensional con volúmenes elementales de cuatro nudos que encierran una morfología tetraédrica irregular, cuyo atributo es un valor de resistividad eléctrica. La malla generada consta de 8505 elementos y 1738 nudos (Figura 4.7).

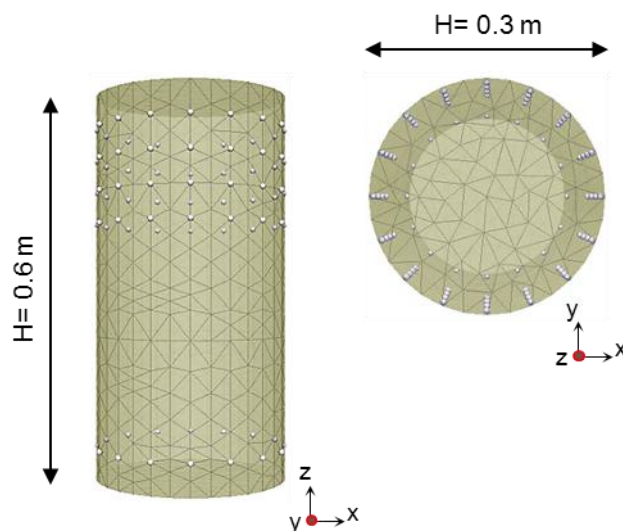


Figura 4.7. Representación esquemática del tanque de electrodos. Vista frontal y en planta del dispositivo y ubicación de los electrodos [e]. El esquema representa una malla de volúmenes finitos generada con *BERT* (*DCFEMLib*) y visualizada con el software *ParaView 3.8.0-RC1*.

Los resultados pueden ser visualizados y editados mediante el software *ParaView 3.8.0-RC1*, el cual permite realizar cálculos adicionales con los datos procesados.

Los valores de resistividad localizados entre dos anillos consecutivos de electrodos son los más sensibles al proceso de interpolación y, por tanto, los menos precisos. Cuatro de los cinco

anillos de electrodos se sitúan en los 20 cm más próximos a la superficie de hidratación, mientras que el quinto se localiza a una profundidad de 55 cm. Por tanto, existe un espacio intermedio de 35 cm de espesor, en el que la fiabilidad de la interpolación de los valores de resistividad es baja.

La interpretación de esos datos, poco fiables, puede inducir errores. Por ello, en el presente estudio sólo tendremos en cuenta los datos asociados a los 25 cm superficiales de la columna.

3.3 MODELIZACIÓN. EL CÓDIGO COMPASS

La determinación de los parámetros hidráulicos de los serrines de granito compactados a partir de los experimentos realizados, es complicada. Para abordar este problema, hemos acudido al empleo de herramientas informáticas que de forma indirecta nos permitan ajustar datos experimentales (software de modelización).

Los experimentos realizados son susceptibles de ser modelizados teóricamente mediante códigos de simulación numérica, en particular aquellos que permiten resolver las ecuaciones de flujo en medios no saturados. Entre estos códigos se encuentra *COMPASS* (Thomas, 1985).

COMPASS (*COde for Modelling PARTly Saturated Soil*) es un código en elementos finitos desarrollado en el GRC¹ (Cardiff University, UK), con el que puede estudiarse el comportamiento de los suelos desde múltiples puntos de vista: el análisis de la zona no saturada, el estudio de la conducción de calor y los procesos acoplados de esfuerzo-deformación-flujo (Seetharam *et al.*, 2006).

Para su aplicación en medios no saturados, *COMPASS* cuenta con rutinas específicas que le permiten tratar el flujo de agua, el flujo de aire, la transferencia de calor, el transporte de solutos y distintos comportamientos mecánicos.

El código está imbricado con el paquete gráfico *GID*², que permite tanto el preprocesado de los datos, como el postprocesado y la visualización de los mismos (Caffaratti *et al.*, 2004). Mediante la herramienta *GID*, la simulación numérica de problemas de flujo en la zona no saturada se aborda siguiendo la siguiente secuencia: 1. Definición geométrica del problema; 2. Implantación de las características de los distintos materiales que lo componen y el algoritmo empleado para el cálculo; 3. Definición de las condiciones de contorno; 4. Curvas temporales de evolución de las condiciones de contorno, en su caso; 5. Construcción de la malla de cálculo a partir de la geometría del problema; 6. Cálculo desde *COMPASS*; 7. Visualización de resultados y edición (post proceso).

Nuestras observaciones experimentales serán comparadas con los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas desarrolladas con el código *COMPASS*. Ello nos permitirá

¹ Geoenvironmental Research Centre (www.grc.cf.ac.uk)

² Software desarrollado en el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE – Universidad Politécnica de Cataluña; www.cimne.upc.es)

hacer una mejor aproximación al valor de la conductividad hidráulica y la capacidad de campo de los serrines de granito compactados, que mejor reproduzcan las observaciones experimentales.

4 RESULTADOS

Se llevaron a cabo tres experimentos de flujo en serrines de granito, compactados y no saturados, empleando para ello los diseños experimentales descritos en el apartado 2 del presente capítulo.

Los experimentos difieren entre sí en cuanto a las condiciones iniciales de los serrines, el tiempo de ejecución y las técnicas empleadas para la monitorización de mismos.

4.1 CILINDRO DE METACRILATO. ENSAYO 1.

En este experimento, el material presentaba una baja humedad inicial ($\theta_{media} = 20\%$) y porosidad elevada ($\phi_{media} = 62\%$), tal y como queda recogido en la Tabla 4.1.

Durante la ejecución del ensayo, la columna de serrines se fue saturando desde la zona superior, de acuerdo con el protocolo de hidratación. Los cambios locales de humedad y succión registrados por los sensores de hidratación (sondas de capacitancia y psicrómetros), permitieron registrar en tiempo real el avance del frente de hidratación y el cambio en las propiedades iniciales del material. El ensayo se dio por concluido cuando se observó la salida de lixiviados a través de los sistemas colectores ubicados en la base de la columna.

4.1.1 BALANCE HÍDRICO

El tiempo de ejecución del ENSAYO-1 fue de, aproximadamente, una semana. Durante ese tiempo, se llevan a cabo seis etapas de hidratación. Considerando las pérdidas por evaporación y el agua recogida en el sistema de drenaje de lixiviados, elaboramos el balance hídrico del sistema (Figura 4.8). A partir de estos datos, con el conocimiento de las propiedades físicas que presentaba el material al comienzo del ensayo, pudimos establecer de forma teórica la evolución del grado medio de saturación del material.

La evolución del grado de saturación, que se ilustra en la Figura 4.8, se ha elaborado con datos puntuales y posee un carácter aproximativo. Los picos reflejan momentos de vertido, en los cuales el agua permanece inundando la superficie de la columna durante el tiempo necesario para su infiltración, por lo que la saturación indicada gráficamente denota el grado de saturación que alcanzará el material una vez se infiltre el agua aportada.

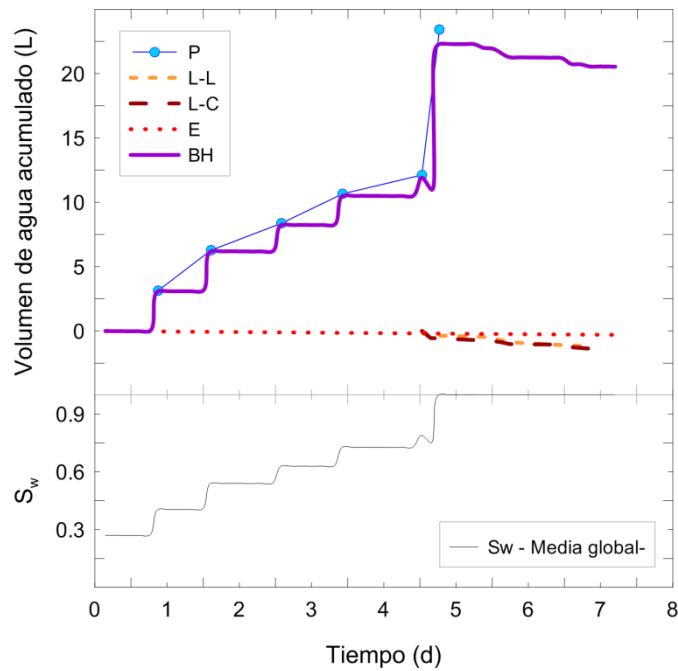


Figura 4.8. Balance hídrico simulado durante el ENSAYO-1: P , agua vertida; $L - L$, lixiviados laterales; $L - C$, lixiviados centrales; E , evaporación; BH , balance hídrico; S_w , evolución del grado de saturación global de la columna de serrines de granito.

Es interesante destacar que la columna, lejos de saturarse, alcanza un estado estacionario hidráulico en el que el grado de saturación máximo es ~ 0.62 . Ello sugiere que la máxima capacidad de retención de los serrines compactados bajo las condiciones de ensayo, a partir de la cual se produce drenaje de los excesos por gravedad, es equivalente a un contenido volumétrico en agua de $\sim 38\%$.

4.1.2 SONDAS DE CAPACITANCIA

Los datos registrados por las sondas de capacitancia ilustran con claridad la llegada del frente de saturación tras cada una de las etapas de hidratación superficial (Figura 4.9). Las sondas aportan información del contenido volumétrico en agua. Para transformarlo en grado de saturación hemos tenido en cuenta, en primer lugar, la calibración de la sonda (ecuación e.4.3); segundo, la porosidad media de la capa en la que cada una de ellas se encontraba ubicada (Tabla 4.1).

Como cabe esperar, las observaciones muestran respuestas diferentes para cada sensor, en función de la profundidad a la que se encuentra y el tiempo considerado. En las zonas superficiales se produce una llegada rápida del frente de hidratación, lo cual se refleja en un pico abrupto de la curva (sensores a 11 y 17.5 cm). Conforme el agua vertida se reparte entre un mayor volumen de poro, su llegada a zonas más profundas muestra curvas suavizadas de incremento de la humedad (sensores a 24.5 y 32 cm).

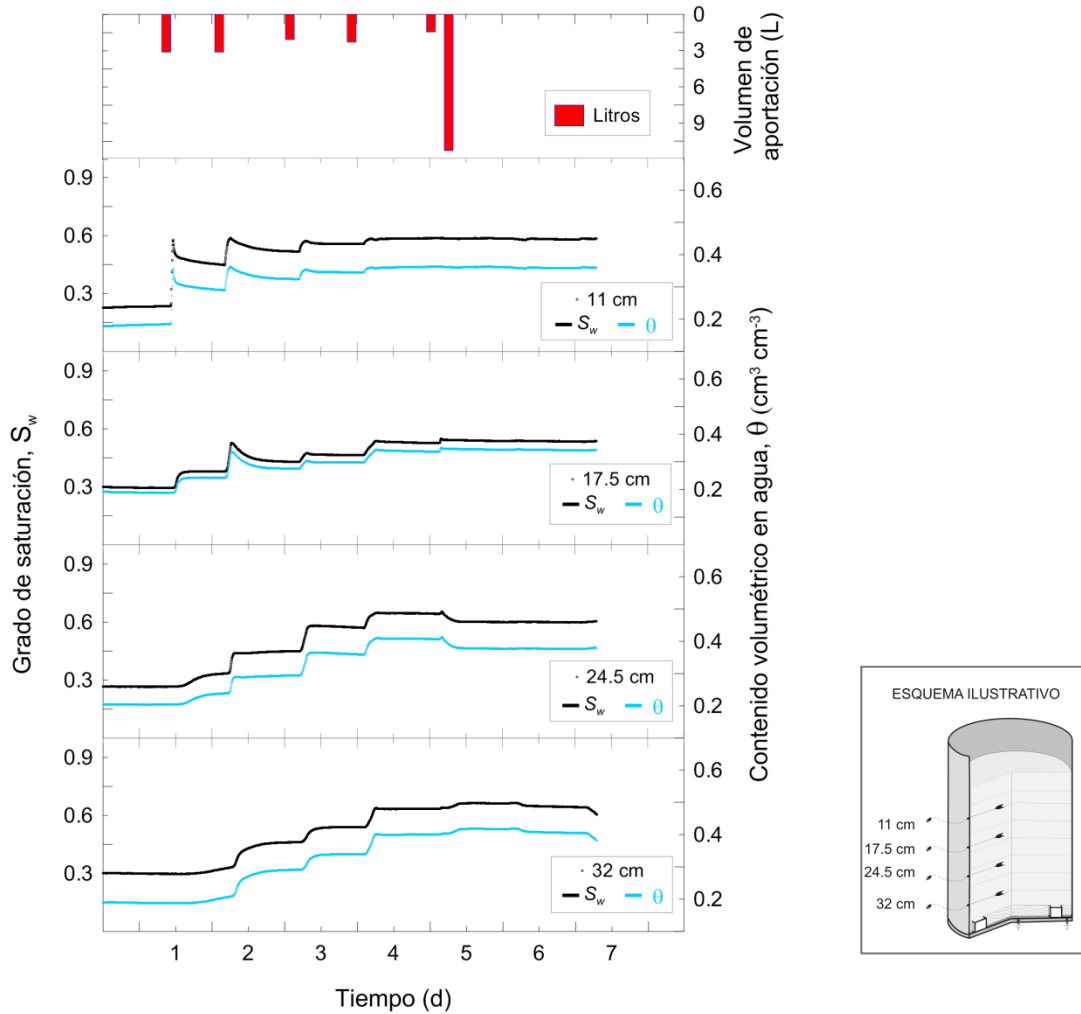


Figura 4.9. ENSAYO-1: grado de saturación (S_w) determinado a partir del contenido volumétrico en agua (θ) registrado por las sondas de capacitancia, ubicadas a diferente profundidad dentro de la columna de ensayo (esquema ilustrativo). Comparación con los escalones de agua aportados al sistema.

Todas las curvas muestran una tendencia coherente a alcanzar un valor de saturación estacionario tras la cuarta etapa de vertido. En ese momento, la saturación es de ~ 0.6 . A partir ahí, todos los sensores manifiestan escasas variaciones, con la excepción del sensor situado a 24.5 cm de profundidad, el cual muestra un ligero descenso del grado de saturación hacia el quinto día. Interpretamos este hecho como el resultado de un reajuste de humedad en el entorno del sensor.

4.1.3 PSICRÓMETROS

En un suelo, la succión es la suma de la presión capilar (succión matricial) y la presión del gas alojado en los poros (succión osmótica). Los cambios de succión registrados por los psicrómetros y la evolución de esta transición, reflejan el momento y el modo en el que el frente de saturación alcanza las diferentes posiciones de los sensores. Los datos muestran variaciones bruscas de succión en posiciones someras (Figura 4.10), mientras que los

psicrómetros situados a mayor profundidad (27 y 32 cm) reflejan curvas más suavizadas, relacionadas con una llegada tardía del frente de hidratación.

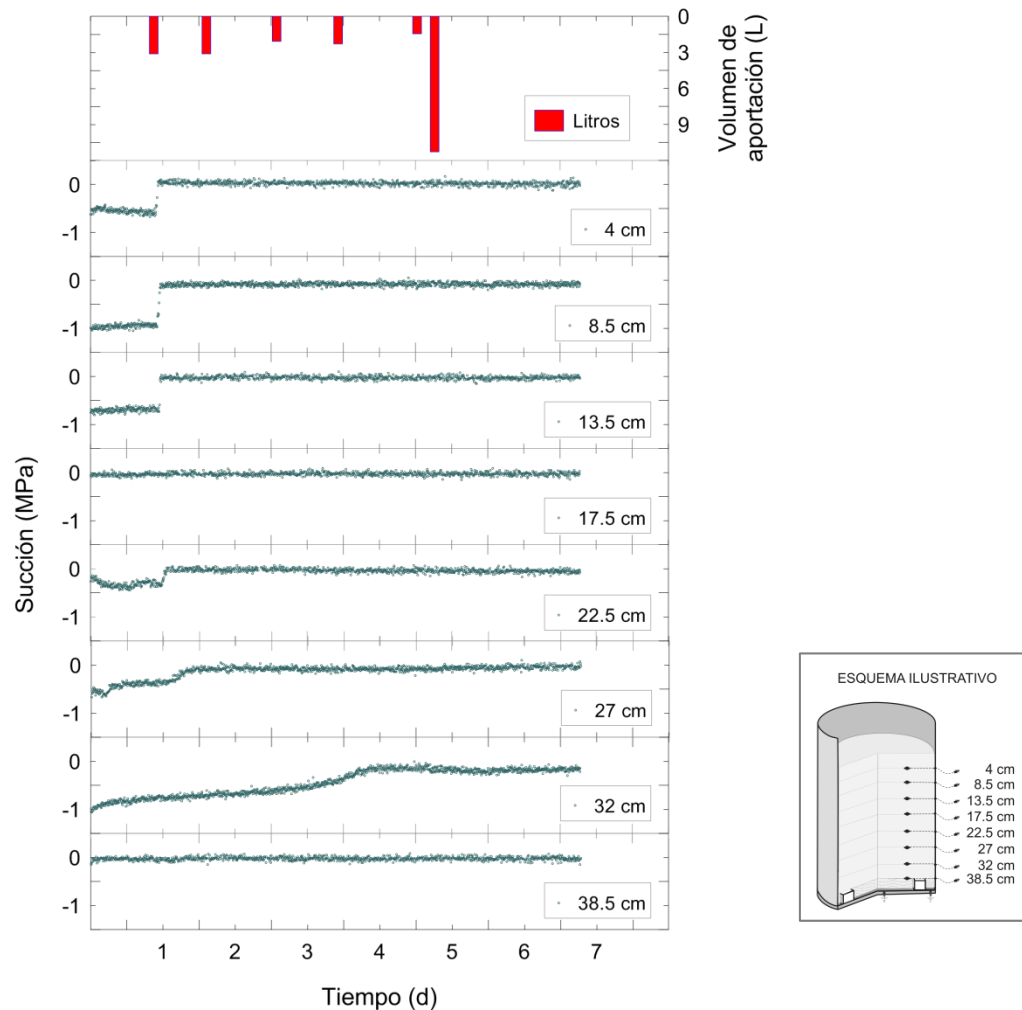


Figura 4.10. ENSAYO-1: succión del suelo registrada por los psicrómetros ubicados a diferente profundidad dentro de la columna de ensayo (esquema ilustrativo). Comparación con los datos de agua vertida sobre el sistema.

Los sensores situados a 17.5 y 38.5 cm, manifiestan un valor constante de succión nula, lo cual es interpretable como saturación del medio. Sin embargo, considerando las condiciones iniciales de ensayo y la baja precisión de los psicrómetros empleados (ver apartado 3.2.1), cabe pensar en un mal contacto sensor-suelo o una alta humedad local en el entorno del sensor como posibles causas de estas lecturas.

El psicrómetro situado a 32 cm muestra una evolución similar a la de la sonda de capacitancia ubicada a igual profundidad. Por su lado, los sensores ubicados a 13.5 y 27 cm muestran cierta relación con las sondas de capacitancia situadas a 11 y 24.5 cm, respectivamente.

Los valores registrados por los psicrómetros permiten determinar el momento de la llegada del frente de saturación a distintas posiciones de la columna de ensayo. Sin embargo, la baja precisión de los sensores empleados y el rango de medida para el cual han sido diseñados,

impide establecer correlaciones entre el valor de succión registrado y el grado de saturación asociado al mismo.

4.1.4 MODELIZACIÓN

Los resultados experimentales del ENSAYO-1 han sido modelizados empleando el código COMPASS, con el fin de obtener los parámetros hidráulicos de interés en los serrines de granito, en las condiciones de ensayo.

El dominio fue definido geoméricamente a través del software GID, empleando las condiciones iniciales de ensayo determinadas durante la construcción (Tabla 4.1). Ello dio lugar a un modelo 2D que reproduce la sección longitudinal central de la columna experimental (Figura 4.11). En ella se distinguen las ocho capas de material superpuestas y la región superficial a partir de la cual se llevó a cabo la hidratación.

Además de las propiedades físicas de las diferentes capas (Tabla 4.1), la implantación de las características de los materiales se completó con los parámetros propios del algoritmo empleado para resolver el problema de flujo no saturado (en este caso, el modelo de Mualem-Van Genuchten; combinación de las ecuaciones e.3.18 y e.4.4). A partir de esta información, se definieron las condiciones iniciales de ensayo en términos de succión (ψ_i). Los parámetros característicos del modelo quedan recogidos en la Tabla 4.2.

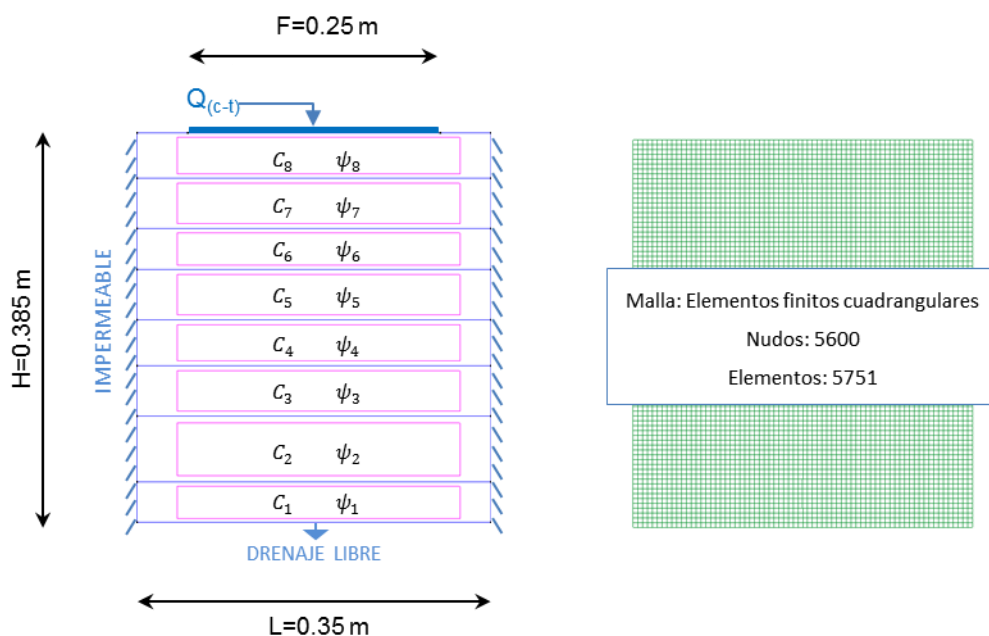


Figura 4.11. Simulación numérica del ENSAYO-1: definición geométrica del problema y condiciones iniciales (Pre-proceso GID). C_i , condiciones iniciales de la capa i (espesor, humedad, porosidad); $Q_{(c-t)}$, condición de flujo vertical controlado por una curva caudal-tiempo; F , longitud de la región de entrada de caudal; L y H , dimensiones del modelo.

Las condiciones iniciales del problema se completan con la imposición de las condiciones de contorno, con las cuales se describe el efecto de los procesos externos que afectan al sistema durante el periodo de simulación. En el modelo, se suponen paredes laterales impermeables y una condición libre en la zona inferior del modelo. En la zona superior se define una región acotada durante los periodos de hidratación, sobre la cual se impone una condición de entrada de flujo vertical controlada por una curva caudal-tiempo ($\phi_{(c-t)}$). La curva define la secuencia de hidratación real llevada a cabo durante el ensayo experimental hasta la aparición de los primeros lixiviados. Se trata, por tanto, de una función escalonada.

Una vez definida las condiciones iniciales del problema se genera una malla de 5600 elementos cuadrangulares y 5751 nodos.

El problema se formula a partir de unos parámetros conocidos, obtenidos de forma experimental, y otros cuya determinación constituyen el objetivo último de la simulación numérica. Las propiedades físicas del material y los parámetros de la curva de retención de Van Genuchten para los serrines de granito, constituyen los elementos conocidos; los parámetros a determinar: conductividad hidráulica saturada (K_s) y capacidad de campo (C_c).

Tabla 4.2. Parámetros hidráulicos y ecuaciones empleados para la resolución del modelo numérico.

Parámetros	Expresión / Valor	Unidad	Referencia	
Condiciones iniciales (C_i)	θ_i	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Empírico (Tabla 4.1)	
	ϕ_i	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Empírico (Tabla 4.1)	
Saturación específica	$S_e = \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$	--	Empírico	
Parámetros de ajuste de la curva de retención de serrines de granito	α	0.193	kPa^{-1}	Barrientos <i>et al.</i> (2010)
	m	0.291	--	Barrientos <i>et al.</i> (2010)
	n	1.41	--	Barrientos <i>et al.</i> (2010)
	θ_r	0.09	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	Barrientos <i>et al.</i> (2010)
Succión (ψ_i)	$\psi_i = \frac{(S_e^m - 1)^{-n}}{-\alpha}$	kPa	Van Genuchten (1980)	
Conductividad hidráulica (k_i)	$k(\psi_i) = K_0 \left[S_e^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \right]$	m s^{-1}	Mualem (1976)	

* Subíndice i , capa; θ_i , contenido volumétrico en agua; ϕ_i , porosidad; S_e , saturación efectiva; θ_r , contenido volumétrico en agua residual; θ_s , contenido volumétrico en agua máximo; K_0 , conductividad hidráulica equivalente a la conductividad hidráulica en saturación.

Los parámetros hidráulicos fueron calibrados a partir del resultado del modelo numérico respecto de los datos observados mediante las sondas de capacitancia (Figura 4.9). Para ello,

se analiza el grado de saturación teórico del modelo en 67 instantes definidos (N) empleando la siguiente función para determinar el error medio relativo, M_p , entre resultado numérico y experimental:

$$M_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(R_t^i - R_e^i)^2}{(R_e^i)^2} \quad \text{e.4.5.}$$

donde R_t^i y R_e^i representan el grado de saturación obtenido por el modelo numérico y medido por el sensor en el instante i , respectivamente. La ecuación e.4.5 fue empleada en cada una de las cuatro profundidades de emplazamiento de los sensores.

Los mejores resultados (Figura 4.12) se obtuvieron adoptando como valor de la conductividad hidráulica saturada $2 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ y una capacidad de campo del 39%. Los valores de error medio relativo obtenidos con este ajuste son 0.03, 0.04, 0.004 y 0.006, para cada una de las capas, en orden creciente de profundidad de ubicación del sensor.

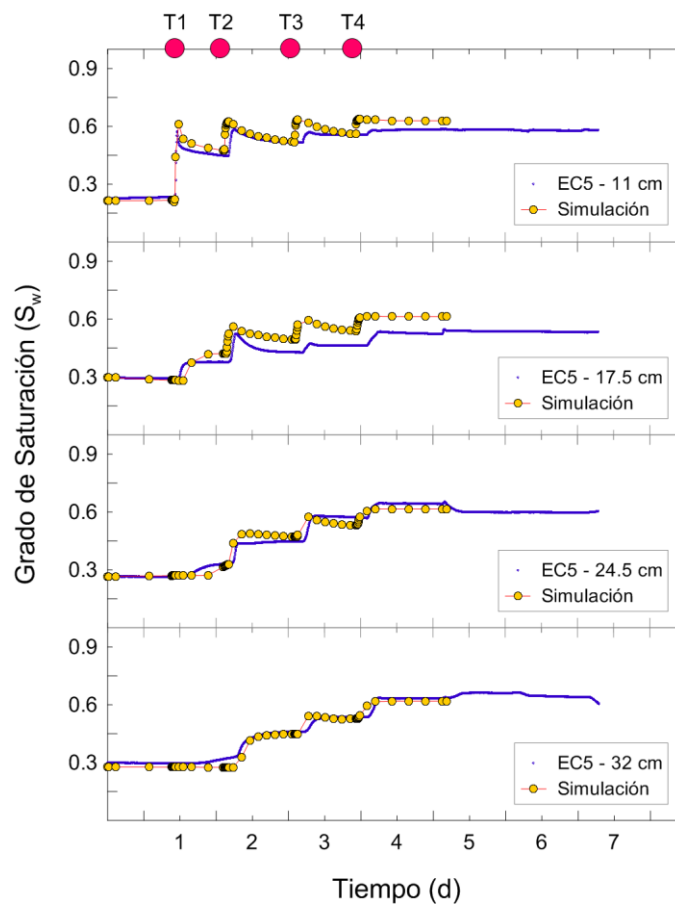


Figura 4.12. Representación de los resultados del modelo realizado con COMPASS, comparados con los datos experimentales observados. Parámetros empleados: $K_s = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, $C_c = 0.39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; T1, T2, T3 y T4, aportación de agua con duración $\sim 1 \text{ h}$.

Cada uno de los instantes de aportación de agua lleva asociado un pico en la curva del grado de saturación, en torno a la cual se observan los mayores desajustes entre simulación y datos

experimentales. Los momentos de estabilización posteriores a los vertidos muestran un buen ajuste en la mayoría de los casos, siendo el sensor situado a 17.5 cm de profundidad el que presenta los resultados más pobres.

La evolución del sistema puede visualizarse de forma global en 2D empleando las utilidades de post-procesado gráfico del software GID, las cuales permiten a su vez la representación continua de la simulación por medio de animaciones. En la Figura 4.13 se muestra el estado del modelo al inicio de cada uno de los instantes de vertido (T1, T2, T3 y T4) los cuales, a su vez, representan los estadios finales alcanzados a consecuencia del vertido anterior, en cada caso.

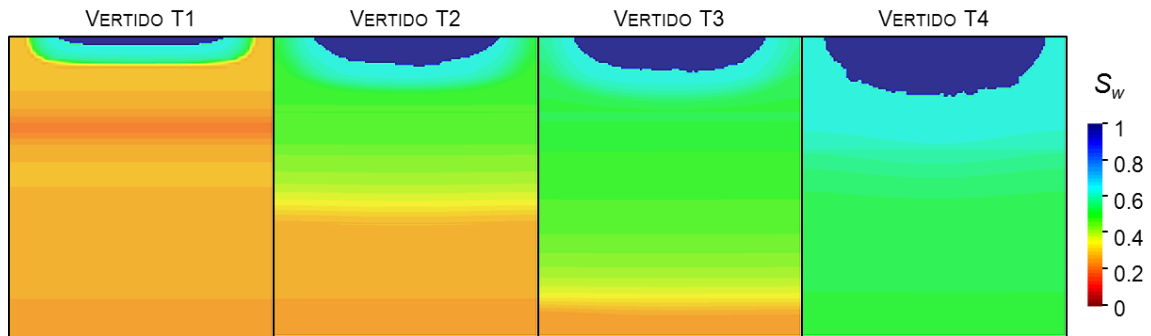


Figura 4.13. Evolución 2D del grado de saturación (S_w) en el ENSAYO-1. Resultados de la simulación numérica empleando los parámetros $K_s = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, $C_c = 0.39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

◆ SENSIBILIDAD DEL MODELO RESPECTO DE LOS PARÁMETROS EMPLEADOS

Las ecuaciones del flujo empleadas en este modelo numérico relacionan succión, conductividad hidráulica y humedad del suelo, mediante parámetros basados en un ajuste empírico. Hemos empleado estos datos para definir tanto las propiedades físicas como las condiciones iniciales de ensayo, si bien están condicionados por la incertidumbre experimental asociada a su determinación: la precisión de los instrumentos de medida, la metodología empleada o los errores de tipo aleatorio, deben ser tenidos en consideración y trasladarlos adecuadamente a los modelos numéricos para calibrar su fiabilidad.

Teniendo en cuenta que cada parámetro posee una influencia variable sobre el resultado de la modelización, la simulación numérica debe completarse con un análisis de la sensibilidad del modelo respecto de ciertos parámetros. En nuestro caso, se analiza la influencia de la conductividad hidráulica saturada y capacidad de campo estimados. Además, evaluaremos la sensibilidad del modelo respecto a los parámetros α y m de la curva de retención de los serrines de granito. El valor de estas constantes se obtuvo a partir de la calibración experimental recogida por Vázquez (2005), en la que únicamente se tuvieron en cuenta valores asociados a succiones elevadas.

El análisis de sensibilidad del modelo se lleva a cabo comparando los resultados del ajuste de referencia (caso base), obtenido a partir del valor de los parámetros para los que el error medio relativo de ajuste, M_p , era mínimo en cada profundidad (ecuación e.4.5). Tomando

como parámetros sensibles K_s , C_c , α y m , hemos variado secuencialmente su valor óptimo en una magnitud equivalente a $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$.

La elección de estos grados de variación obedece, en el caso de la capacidad de campo, a criterios específicos de la calibración de las sondas de humedad empleadas, cuya precisión es del 2%. Para el caso particular de K_s , las variaciones se han estimado sobre el valor del $\log_{10}(K_s)$ debido a que, tomando su valor natural, una variación de $\pm 10\%$ resulta poco representativa. Por su parte, los parámetros de la curva de retención de los serrines, se varían de modo exploratorio, adoptándose los mismos valores que para el resto de parámetros.

Destacamos que el análisis ha sido secuencial, es decir, sólo se ha modificado el valor de un parámetro manteniendo el resto constantes e igual a su valor óptimo. La comparación se ha realizado mediante el cálculo de la sensibilidad normalizada S_0 (Espinha Marques *et al.*, 2011), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$(S_0)_i = \left(\frac{(A_m - A_p)}{A_p} \right) / \left(\frac{(P_m - P_p)}{P_p} \right)_i \quad \text{e.4.6.}$$

en la cual A_p representa el valor de referencia (caso base), para el que P_p es el valor del parámetro analizado, y A_m el resultado del modelo cuando se varía el parámetro hasta un valor P_m . La expresión ofrece un valor discreto para cada uno de los 67 instantes de tiempo i considerados. Finalmente, del análisis de S_0 en el modelo se obtienen valores a distinta cota que dan lugar a un perfil asociado a cada parámetro modificado y su correspondiente rango de variación. Los valores de P_m empleados en la obtención de A_m se muestran en la Tabla 4.3, expresados como incrementos de P_p .

Tabla 4.3. Análisis de sensibilidad del modelo numérico a partir de los datos experimentales del ENSAYO-1. Parámetros modificados y variación aplicada.

Parámetro	Unidades	$P_p - 5\%$	$P_p - 5\%$	P_p	$P_p + 5\%$	$P_p + 10\%$
K_s	(m s ⁻¹)	5.38·10 ⁻⁷	1.04·10 ⁻⁶	2.00·10 ⁻⁶	3.85·10 ⁻⁶	7.43·10 ⁻⁶
C_c	(cm ³ cm ⁻³)	0.351	0.371	0.390	0.410	0.429
α	(kPa ⁻¹)	0.174	0.183	0.193	0.306	0.320
m	--	0.262	0.276	0.291	0.306	0.320

* P_p , valor del parámetro analizado; K_s , conductividad hidráulica saturada, incremento porcentual sobre $\log_{10}(K_s)$; C_c , capacidad de campo; α , m parámetros de ajuste de la curva de retención de Van Genuchten.

En la Figura 4.14 se muestran los resultados del análisis de la sensibilidad de los parámetros K_s y C_c del modelo. Para todas las profundidades e incrementos considerados, el parámetro K_s muestra valores de S_0 inferiores a la unidad, aunque con una tendencia creciente en el tiempo. Teniendo en cuenta que K_s expresa velocidad, la tendencia temporal observada es la respuesta natural del modelo ante variaciones en este parámetro.

Las curvas asociadas al punto más somero (11 cm) reflejan valores cercanos a 2 para la primera llegada del frente de hidratación en el caso $P_p \pm 5\%$, y próximo a la unidad en $P_p \pm 10\%$. Esto implica que el resultado de la modelización aumenta un 10% en este punto, independientemente de considerar una variación del 5% o del 10% en el parámetro, ya que para el primer caso la variación del resultado doblaba a la variación del parámetro y, en el segundo, es igual a la unidad.

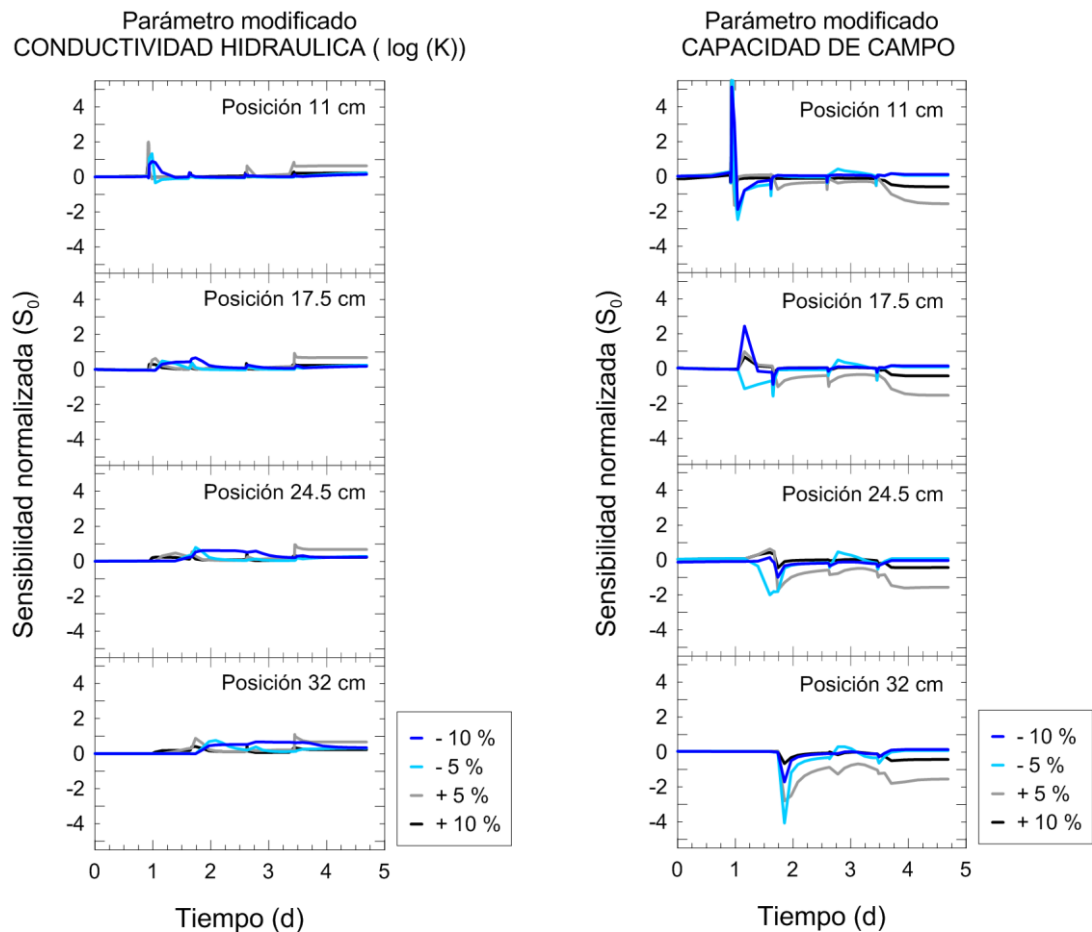


Figura 4.14. Sensibilidad del modelo numérico, asociado al ENSAYO-1, frente a cambios en la conductividad hidráulica saturada (K_s) y la capacidad de campo (C_c).

Las variaciones en el parámetro C_c son las que provocan una respuesta más acusada en el resultado de la modelización. En este caso, los picos de sensibilidad asociados a los instantes de llegada del frente manifiestan modificaciones en los resultados de hasta cinco veces el valor de referencia. Por tanto, el modelo es más sensible al parámetro C_c que a K_s , siendo el valor de la sensibilidad creciente en el tiempo en ambos casos.

Podemos observar también cómo la sensibilidad del modelo es muy dependiente de las condiciones de simulación. En los momentos en los que la simulación discurre en el intervalo comprendido entre dos aportaciones de agua consecutivas (que es cuando se alcanza un régimen estacionario en el modelo y en el sistema), la sensibilidad de los resultados frente a

variaciones en el valor de referencia de los parámetros es menos acusada que cuando la simulación coincide con momentos de aporte de agua (régimen transitorio). En los periodos de comportamiento transitorio, el modelo muestra escasa influencia frente a los cambios en K_s , y una notable atenuación en cuanto a su sensibilidad a cambios en C_c .

Los resultados del análisis de sensibilidad por cambios en los parámetros α y m de la ecuación de Van Genuchten (1980), quedan recogidos en la Figura 4.15. En la misma, podemos constatar que muestran tendencias similares a las descritas para los parámetros anteriores (K_s , C_c). El modelo presenta una mayor sensibilidad frente a variaciones del parámetro m , tanto en régimen transitorio (vertido de agua), como estacionario. En ambos casos, observamos que los mayores cambios se producen a resultados de la brusca llegada del frente de hidratación, percibiéndose un aumento en el valor de S_0 con el tiempo. Nuevamente, se reconoce una importante atenuación en la sensibilidad entre vertidos consecutivos, mostrando valores cercanos a cero en el caso del parámetro α .

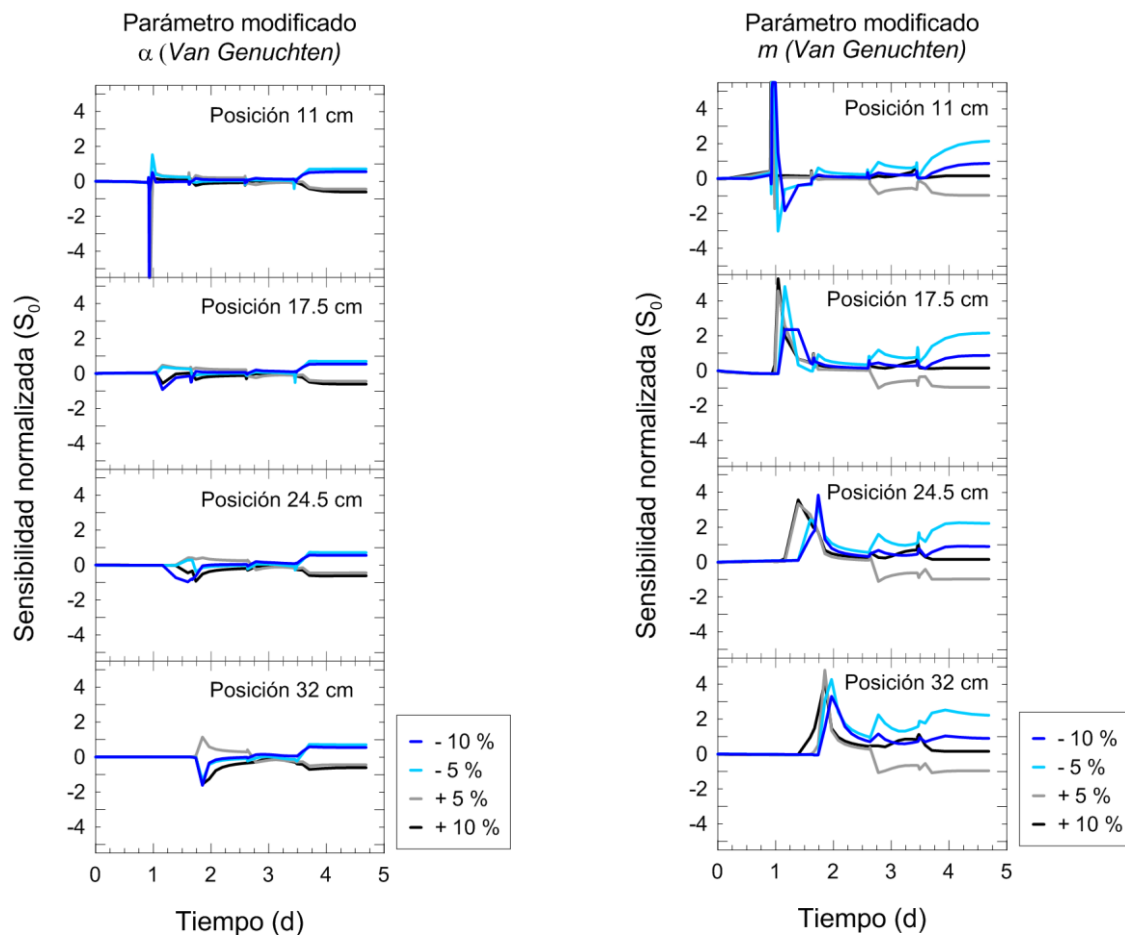


Figura 4.15. Sensibilidad del modelo numérico, asociado al ENSAYO-1, frente a cambios en α y m , parámetros de la curva de retención de Van Genuchten (1980).

El análisis desarrollado ha permitido identificar una mayor sensibilidad los resultados frente a cambios en el valor de los parámetros C_c y m , siendo este último el de mayor influencia. Ello

sugiere que son estos parámetros a los que debe prestarse mayor atención y, en la medida de lo posible, acotar la incertidumbre de su determinación.

El modelo presenta una mayor sensibilidad cuando los procesos discurren por régimen transitorio que cuando alcanzan el estacionario. Esto sugiere que los resultados de las modelizaciones numéricas serán más fiables cuanto más estables sean las condiciones simuladas, para el caso de los serrines de granito.

4.2 CILINDRO DE METACRILATO: ENSAYO 2.

El ENSAYO-2 se desarrolla en la columna experimental equipada con sondas de capacitancia y psicrómetros, empleando serrines de granito parcialmente humedecidos como material de trabajo. Al igual que en el ENSAYO-1, las capas de serrines fueron caracterizadas durante el proceso constructivo (Tabla 4.1).

Las condiciones iniciales de los serrines en el ENSAYO-2 son de mayor humedad y menor porosidad que las correspondientes al ENSAYO-1. Asimismo, el tiempo de ejecución de este experimento se prolongó hasta, aproximadamente, cuatro meses. Durante este periodo se aportó agua al sistema de modo discreto, estudiándose la evolución de los datos registrados por los sensores.

El análisis de la evolución hidráulica de la columna de serrines se ha completado con el estudio de algunos parámetros fisicoquímicos básicos de los lixiviados recolectados (pH y conductividad eléctrica).

Finalmente, la columna experimental fue desmantelada con el fin de observar el impacto del lavado continuo de los serrines de granito a partir de la capa de grava drenante situada en la base de la columna.

4.2.1 BALANCE HÍDRICO

Como hemos indicado, el periodo de ejecución de ensayo fue de, aproximadamente, cuatro meses. Durante este tiempo se realizaron quince aportaciones discretas de agua desde la superficie de la columna. A lo largo del ensayo se registró la evaporación y se cuantificó el volumen de lixiviados recogidos de forma continua. Al igual que en el ENSAYO-1, esto permite cerrar el balance hídrico para el presente ensayo (Figura 4.16).

Se puede observar como el balance hídrico global en el sistema termina siendo negativo. La alta evaporación ($\sim 0.44 \text{ mm d}^{-1}$) y los lixiviados recolectados de forma continuada, contrarrestaron los aportes suministrados desde la superficie de la columna.

Transcurrido cierto tiempo desde la infiltración total de cada aporte de agua discreto, cesa la producción de lixiviados. En estas condiciones, el grado de saturación medio de la columna es de aproximadamente 0.75, correspondiente a una capacidad de retención máxima del material de $\sim 39\%$ (capacidad de campo), expresado en términos de contenido volumétrico en agua.

Este valor es coherente con la capacidad de campo del material sugerida en el ENSAYO-1 (38%).

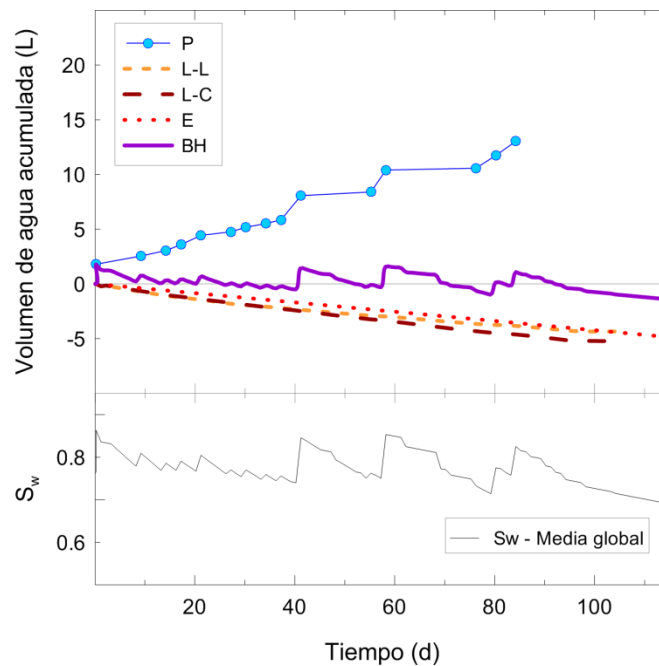


Figura 4.16. Balance hídrico simulado durante el ENSAYO-2: *P*, agua vertida; *L – L*, lixiviados laterales; *L – C*, lixiviados centrales; *E*, evaporación; *BH*, balance hídrico; S_w , evolución del grado de saturación global de la columna de serrines de granito.

4.2.2 RESULTADOS DE LAS SONDAS DE CAPACITANCIA

El registro de estas sondas muestra una gran estabilidad a lo largo de todo el ensayo (Figura 4.17). Los sensores evolucionan de forma gradual con variaciones moderadas de humedad y oscilando, en todos los casos, en un rango de ± 0.05 en torno a un grado de saturación de 0.75.

Asimismo, observamos un descenso progresivo del grado de saturación que se transmite desde las capas superiores a las inferiores, con independencia de los aportes de agua superficial. Este fenómeno puede interpretarse como resultado del reajuste de presiones internas del suelo (succión) entre las distintas capas de la columna, cuyas diferencias en las condiciones iniciales (Tabla 4.1) se traducen en valores igualmente diferentes de sus respectivas succiones medias. Además, el primer escalón de vertido puede generar un excedente de agua en la columna, que se propaga de arriba a abajo. De ese modo, identificamos una tendencia creciente del grado de saturación en el sensor más somero (11.5 cm), en las dos primeras semanas de ensayo mientras que los sensores localizados a cotas inferiores reflejan el correspondiente cambio transcurrido cierto tiempo, el cual tiende a aumentar con la profundidad.

La redistribución de humedad se observa también durante la deshidratación parcial de las capas, asociada a la pérdida por lixiviación del excedente acumulado tras el primer escalón de vertido. Las capas superiores son las primeras en evacuar el agua hacia las zonas inferiores, las

cuales se van estabilizando progresivamente en el tiempo hasta alcanzar un grado de saturación estacionario.

El valor promedio del grado de saturación, determinado a partir de los datos de los sensores de humedad, es de 0.72. Este valor es similar al que puede calcularse de forma teórica, combinando los datos del balance hídrico con los de las condiciones iniciales de ensayo (Figura 4.16).

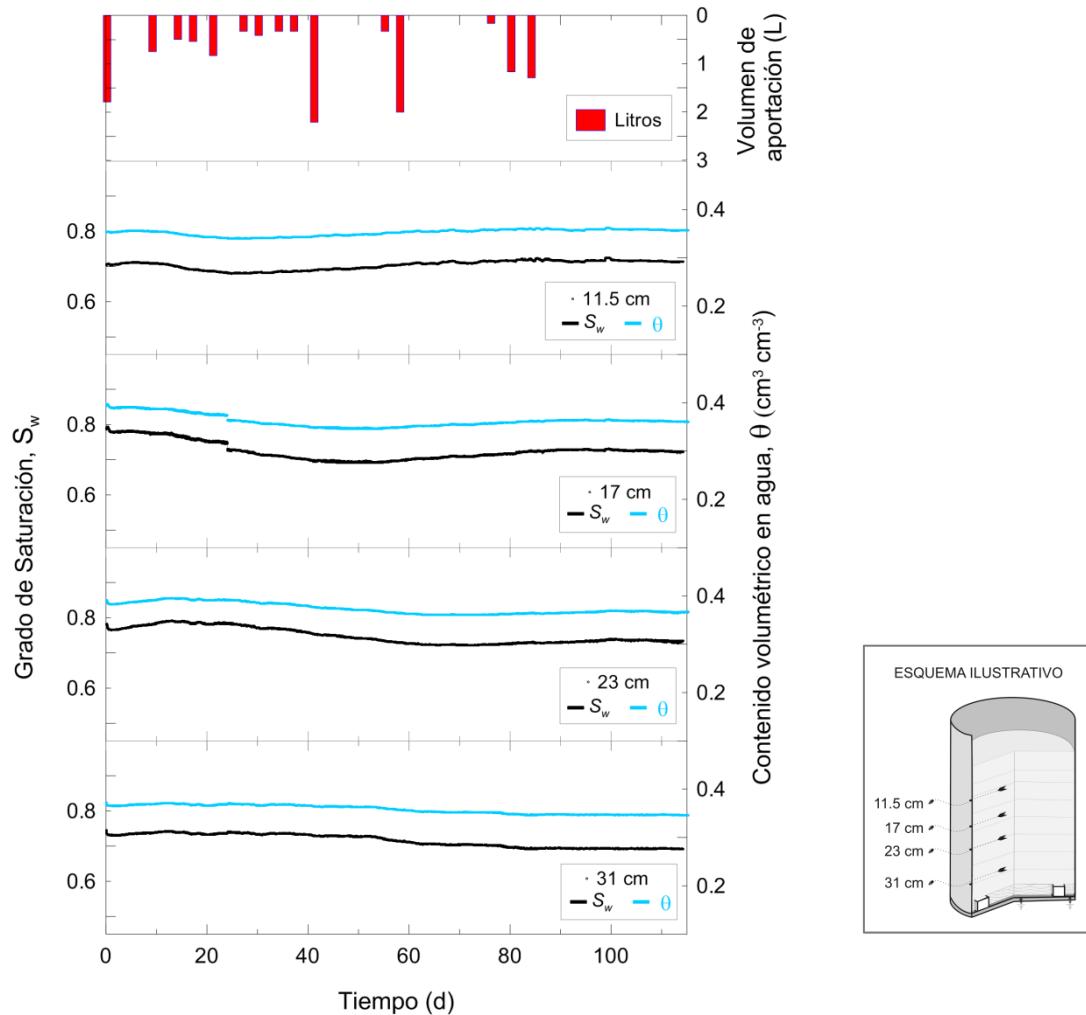


Figura 4.17. ENSAYO-2: grado de saturación (S_w) determinado a partir del contenido volumétrico en agua (θ) registrado por las sondas de capacitancia, ubicadas a diferente profundidad dentro de la columna de ensayo (esquema ilustrativo). Comparación con los escalones de agua aportados al sistema.

La capacidad de campo de los serrines se puede transformar a succión empleando la ecuación e.4.4. El valor promedio que obtenemos se sitúa en torno a -15 kPa, el cual coincide razonablemente con valores sugeridos en la literatura para materiales granulares tipo limo (Richards y Weaver, 1944).

La estimación de parámetros hidráulicos a partir de los registros de las sondas de capacitancia puede ser cuestionada ante la ausencia de señales identificables que permitan asociar el momento del vertido con una respuesta específica de los sensores. Así, es posible que las

sondas EC-5 no sean adecuadas cuando las condiciones de humedad del material son elevadas. En esas circunstancias, la escasa diferencia de succión entre dos estados de alta humedad puede dificultar la propagación de la información del cambio en el contenido en agua hacia zonas parcialmente aisladas, caso de las porciones del suelo comprendido entre las puntas del sensor (Figura 4.2).

◆ COMPARACIÓN DE LA SEÑAL CAPACITIVA ENTRE ENSAYO-1 Y ENSAYO-2

El ENSAYO-1 y el ENSAYO-2 difieren en las condiciones iniciales presentada por los serrines, así como en los tiempos de ejecución. Si comparamos los perfiles de las sondas de capacitancia durante un periodo semanal en ambos ensayos (Figura 4.18), se observa como el mayor contenido inicial de agua de los serrines del ENSAYO-2 condiciona, por un lado, la estabilidad del registro en el rango de alta humedad. Éste, por situarse próximo a la capacidad de campo de los serrines, permite que el material drene el agua aportada sin experimentar variaciones significativas.

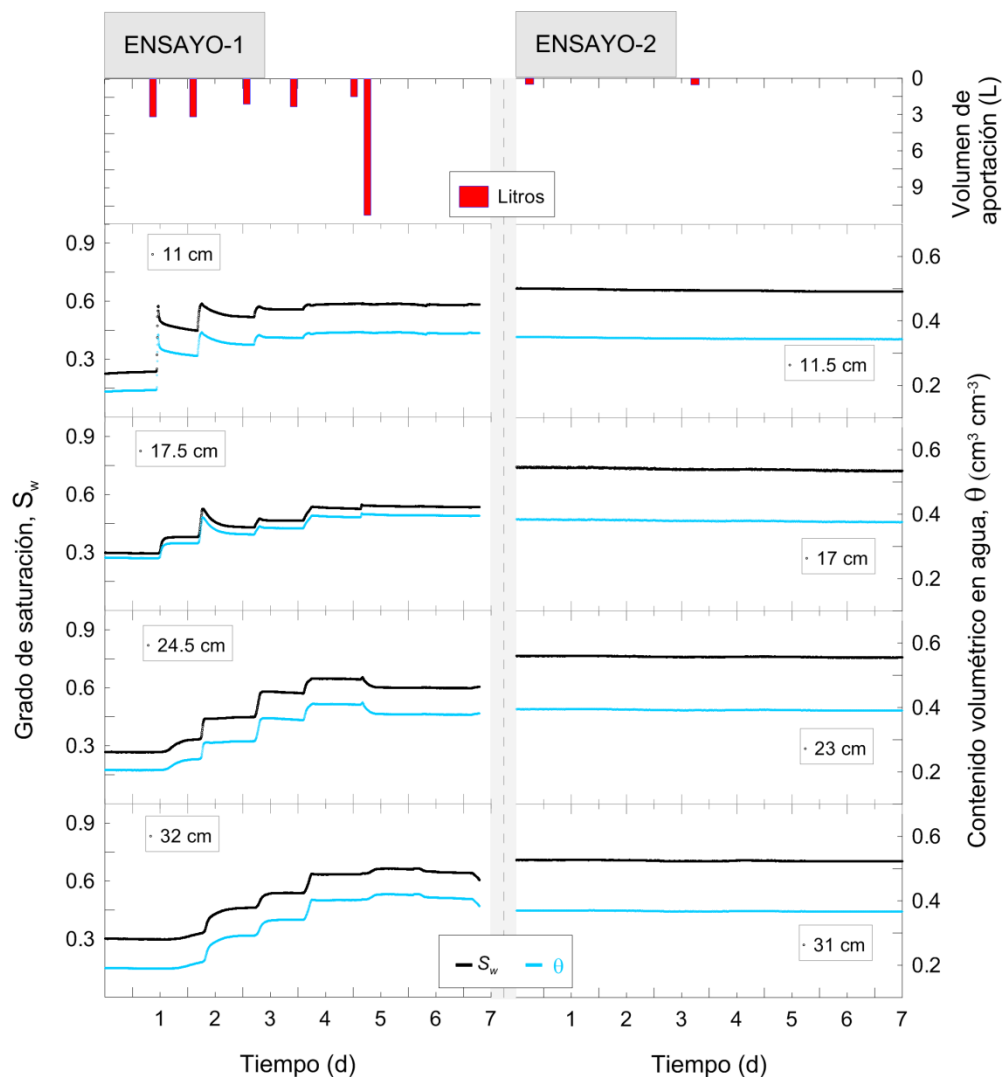


Figura 4.18. Comparación de un periodo semanal entre el ENSAYO-1 y el ENSAYO-2. S_w , grado de saturación; θ , contenido volumétrico en agua.

Por otra parte, la alta humedad inicial de los serrines en el ENSAYO-2 respecto del ENSAYO-1, favorece la mayor compactación del material (menor porosidad), lo cual se ve reflejado en el grado de saturación alcanzado.

Con independencia de la porosidad inicial, la capacidad de campo presentada por los serrines en ambos casos, en términos de contenido volumétrico en agua registrado por las sondas de capacitancia, se sitúa en torno al 38%.

A diferencia del ENSAYO-1, el hecho de que el ENSAYO-2 discurriese por el límite de la capacidad de campo de los serrines, sin experimentar notables variaciones, impidió llevar a cabo la modelización numérica del mismo en busca del ajuste indirecto de los parámetros hidráulicos de interés.

4.2.3 PSICRÓMETROS

En la Figura 4.19 se muestran las señales registradas por los psicrómetros en el ENSAYO-2.

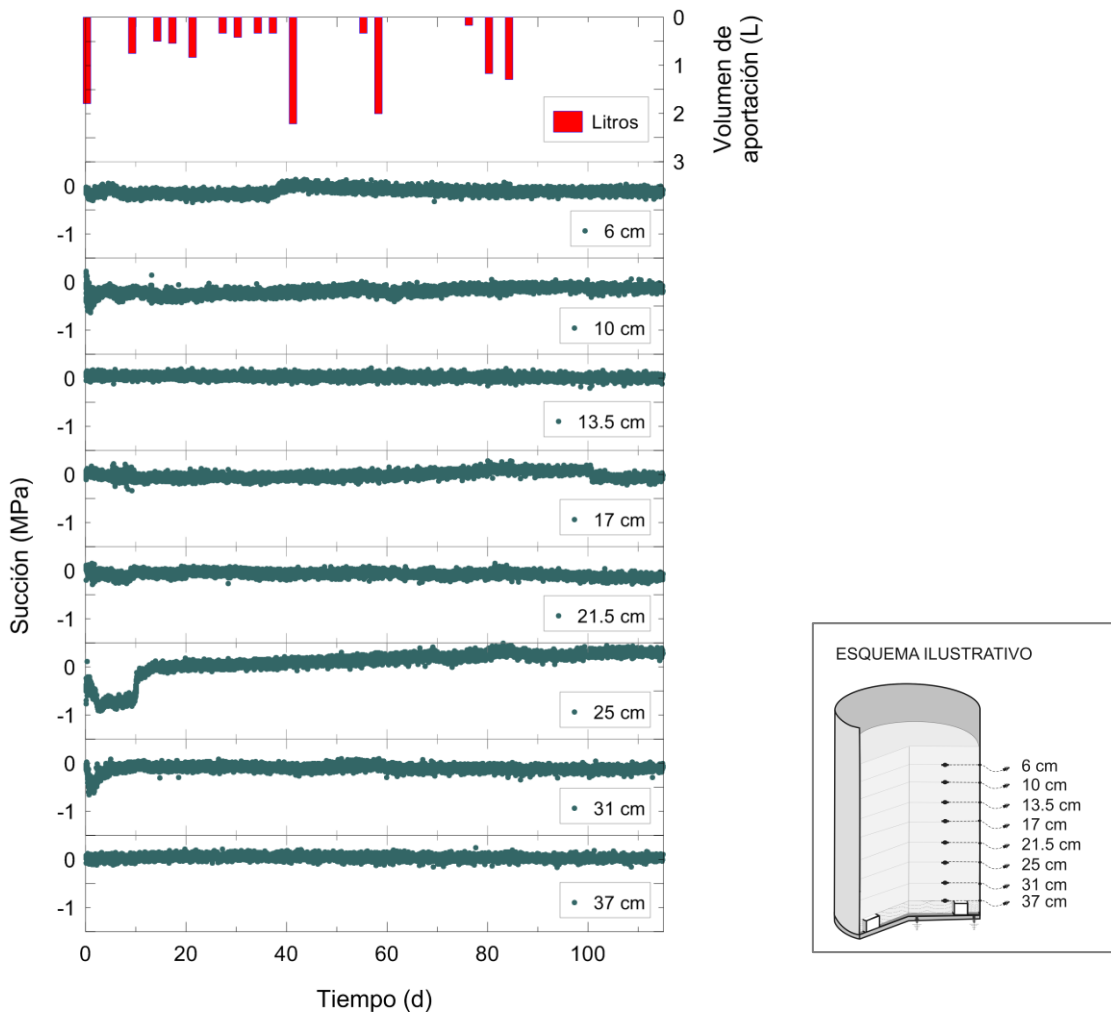


Figura 4.19. ENSAYO-2: succión del suelo registrada por los psicrómetros ubicados a diferente profundidad dentro de la columna de ensayo (esquema ilustrativo). Comparación con los datos de agua vertida sobre el sistema.

La columna de serrines de granito durante la ejecución de este ensayo, transcurre en un rango de humedades alto ($S_w > 0.65$). En términos de succión, esto se traduce a un valor de $\psi > -20$ kPa, condiciones bajo las cuales los psicrómetros ubicados en el seno del material se encuentran por encima de su rango de aplicabilidad (entre -8 MPa y -50 kPa). Esto se refleja en una fuerte dispersión de los datos en torno a 0 kPa (el sensor interpreta saturación), con tendencias vinculadas a fenómenos de reajuste local en el entorno de ubicación de cada sensor (Figura 4.19), aunque carentes de rigor cuantitativo.

Por lo tanto, los datos registrados por los psicrómetros durante el ENSAYO-2, no se consideran informativos del comportamiento del sistema.

4.2.4 ANÁLISIS DE LOS LIXIVIADOS

El volumen de lixiviado recogido en la base de la columna durante el ensayo fue cuantificado y analizado para determinar el pH y la conductividad eléctrica del agua. Los parámetros son evaluados en función de la procedencia de los lixiviados (lateral, central).

En la evolución del pH se observa estabilidad del parámetro en torno a 8.1, tanto para los lixiviados recogidos en los colectores laterales como para los centrales (Figura 4.20); sin embargo, el aumento de la P_{CO_2} a la salida de los colectores, puede haber disminuido el valor inicial. La escasa variabilidad en los datos de pH puede ser indicadora, por un lado, de equilibrio químico; por otro, de rápido tránsito del agua aportada al sistema, cuyo pH inicial se situó en torno a 7 (agua de abastecimiento).

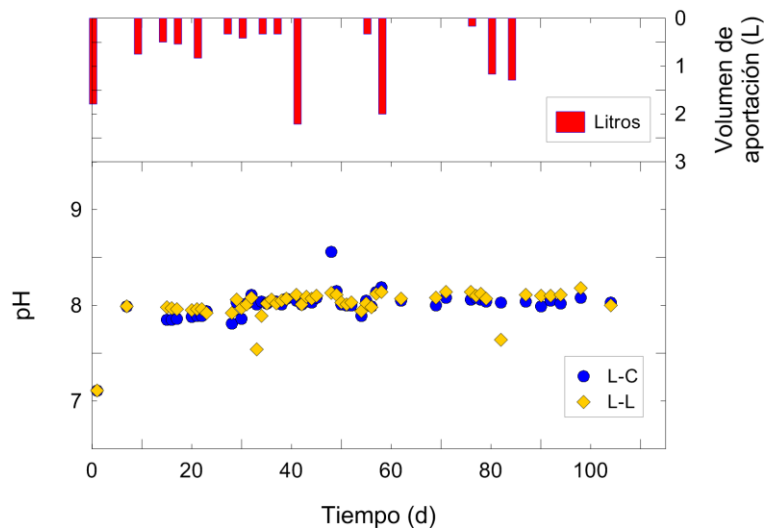


Figura 4.20. Evolución en el pH del agua lixiviada de la columna de serrines de granito. *L – C*, lixiviado central; *L – L*, lixiviado lateral. Comparación con los datos de agua vertida sobre el sistema.

Por su parte, la conductividad eléctrica del agua lixiviada muestra valores comprendidos entre 6.5 y 9 $mS\ cm^{-1}$ (Figura 4.21), los cuales presentan mayor dispersión cuando se trata de lixiviados de procedencia lateral. Los lixiviados centrales no superan valores de 7.5 $mS\ cm^{-1}$.

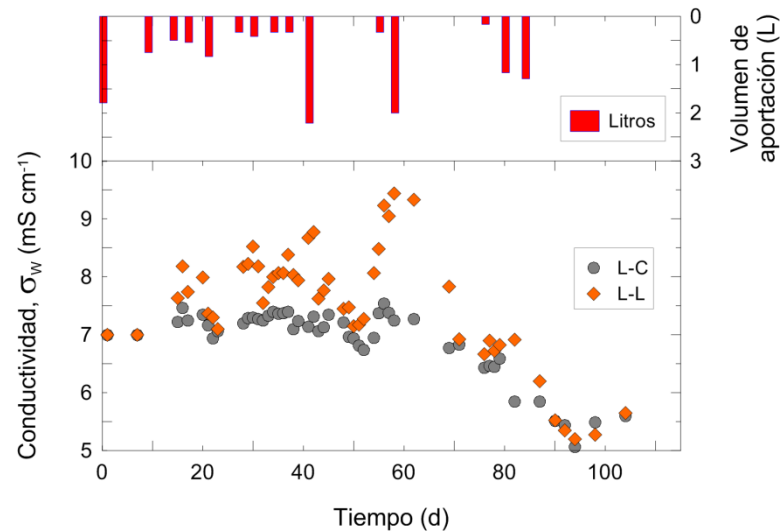


Figura 4.21. Evolución en la conductividad eléctrica del agua lixiviada de la columna de serrines de granito (σ_w). $L - C$, lixiviado central; $L - L$, lixiviado lateral. Comparación con los datos de agua vertida sobre el sistema.

Los picos de σ_w observados en el lixiviado lateral coinciden con el aporte de agua, como respuesta casi inmediata. El perfil de lixiviado central muestra, por su parte, una respuesta más lenta. Esto puede interpretarse como el resultado de un tránsito rápido, con avance preferencial por el perímetro de la columna, durante el cual se produce un lavado del material fácilmente soluble, con muy poco tiempo para que la interacción agua/serrines permita que el pH suba.

En los primeros 60 días se concentran los aportes, por lo que los valores de σ_w son más elevados que en el tramo final del ensayo, durante el cual el comportamiento de los lixiviados laterales y centrales se homogeniza, observándose una tendencia decreciente de la conductividad eléctrica con el tiempo. Este fenómeno se corresponde con la evolución natural del material bajo las condiciones de lavado impuestas durante la ejecución del ensayo.

4.2.5 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

A pesar de que tradicionalmente se emplea para definir la conductividad hidráulica en medios saturados, experimentalmente se encuentra que la ley de Darcy puede constituir una aproximación adecuada para estudiar el flujo de agua (q) en los medios porosos parcialmente saturados (Custodio y Llamas, 1983).

Expresada en términos de gradiente hidráulico (∇h), la fórmula de Darcy generalizada se enuncia como:

$$q = -K\nabla h \quad \text{e.4.7.}$$

K representa el tensor de conductividad hidráulica, el cual se define a partir de la permeabilidad intrínseca del medio k , la densidad del agua ρ , la viscosidad dinámica del agua μ y la aceleración de la gravedad g , según la siguiente expresión:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad \text{e.4.8.}$$

Por su parte, h representa el término que engloba las presiones del sistema, de la siguiente forma:

$$h = \frac{\psi}{\rho g} + z \quad \text{e.4.9.}$$

En la ecuación e.4.9, ψ representa la presión hidráulica en un punto del suelo mientras que z es la cota a la que se encuentra dicho punto. En medios porosos bajo condiciones de flujo variable, ψ adopta valores positivos en las regiones saturadas y negativo (succión), en las no saturadas (Samper *et al.*, 2000).

Durante el ENSAYO-2 se ha inducido la infiltración a través de un medio parcialmente saturado, desplazándose el flujo en dirección vertical, a favor de la gravedad. En este caso, ψ representa el valor de la succión del suelo a las condiciones de humedad alcanzadas por los serrines de granito.

Cada etapa de aportación de agua genera una carga hidráulica superficial variable en el tiempo ya que, durante su infiltración, el nivel disminuye progresivamente mientras que el caudal lixiviado tiende a estabilizarse, hasta hacerse constante. En este momento, se alcanza un régimen de flujo estacionario. A partir de entonces, es posible determinar la conductividad hidráulica del medio a partir de la expresión e.4.7, conociendo la altura de columna de agua superficial y el valor de la succión media del material. El valor de la succión se obtiene a partir de la ecuación de Van Genuchten (1980) adaptada para los serrines de granito, introduciendo el grado de saturación medio presentado por el material en ese instante.

Los valores de succión media calculados para cada uno de los escalones de vertido se encuentran en torno a -10 kPa, con lo cual la contribución de la presión de columna de agua superficial puede considerarse despreciable (<-0.2 kPa).

Este procedimiento se ha llevado a cabo para cada uno de los vertidos efectuados durante el ENSAYO-2, determinándose el valor de la conductividad hidráulica no saturada presentado por los serrines de granito con contenidos en agua próximos a la capacidad de campo del material en las condiciones de ensayo. En la Figura 4.22 podemos observar que los valores de la conductividad hidráulica no saturada están comprendidos entre 10^{-7} y $5 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$, con una ligera tendencia a decrecer con el tiempo. Esta tendencia coincide con el descenso de humedad registrado por las sondas de capacitancia, previamente interpretado como excedentes de agua en el sistema.

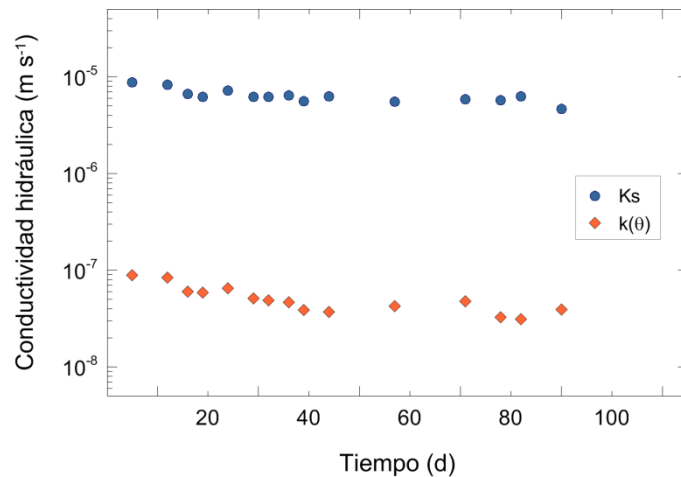


Figura 4.22. Evolución de la conductividad hidráulica de los serrines de granito. K_s , conductividad hidráulica saturada; $k(\theta)$, conductividad hidráulica no saturada, en condiciones de humedad de capacidad de campo.

Con los datos anteriores podemos calcular el valor de la conductividad hidráulica saturada (K_s) asociada a cada instante, empleando para ello el modelo de Mualem-Van Genuchten (MVG) (e.3.18). De acuerdo con ello, los cálculos han permitido estimar un gradiente de K_s para el tiempo de ensayo de $-5 \cdot 10^{-13} m s^{-2}$, cuyo valor ofrece una idea del rendimiento del sistema.

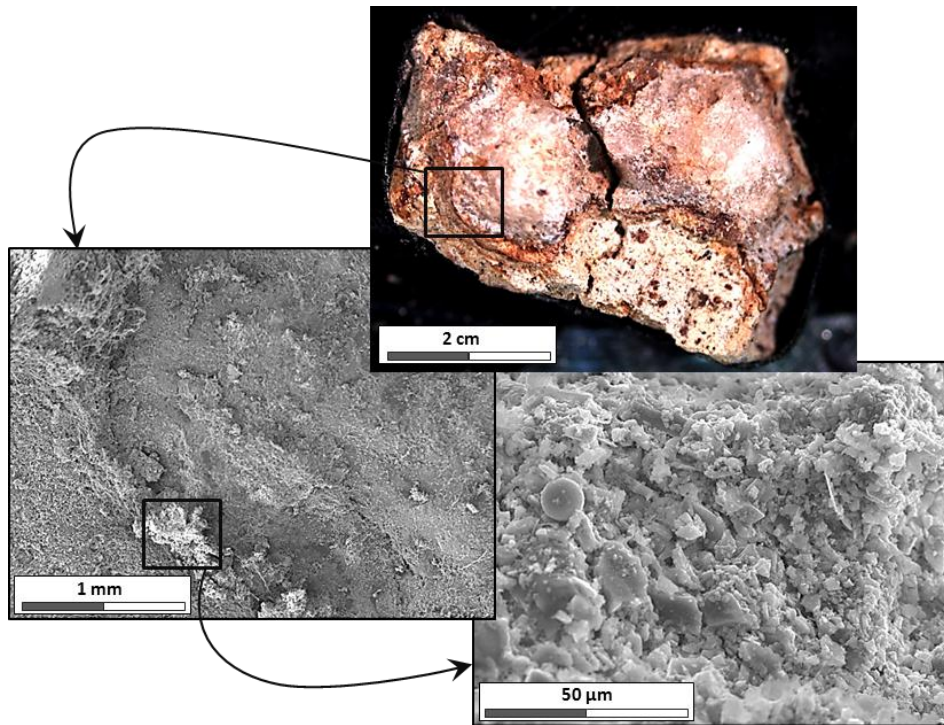
En las fases finales del ensayo, K_s se sitúa en torno a $4 \cdot 10^{-6} m s^{-1}$. Este valor difiere en casi un orden de magnitud ($6 \cdot 10^{-7} m s^{-1}$) con el aproximado por Barrientos (2007) mediante la fórmula de Kozeny-Carman (Bardet, 1997). No obstante, sí es coherente con los resultados presentados por el mismo autor obtenidos a partir de un ensayo de campo Lefranc ($4,5 \cdot 10^{-6} m s^{-1}$), realizado en un vertedero de serrines de granito de más de 20 m de espesor, consolidados por la acción de su propio peso.

4.2.6 DESMANTELAMIENTO DEL ENSAYO-2. ANÁLISIS GEOQUÍMICO DEL MATERIAL.

Tras la finalización del experimento, se procedió al desmantelamiento del dispositivo experimental. Con el fin de estudiar la influencia del lavado de los serrines sobre el material de contorno, se extrajeron varias muestras de la zona inferior de la columna de serrines, en contacto con la capa de grava drenante. En el momento del muestreo, se observó como la grava presentaba una textura grano-portante parcialmente cementada. La cementación era más acusada en el contacto con los serrines. Esa interfaz fue sometida a un análisis textural y geoquímico de detalle, empleando microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrometría de rayos-X.

La observación de visu permite identificar la presencia de un halo de oxidación en torno a los granos de grava. En la Figura 4.23 se muestra el aspecto que presenta la zona de transición a diferentes escalas (A), y el resultado del análisis espectral para determinación de su composición química (B).

(A)



(B)

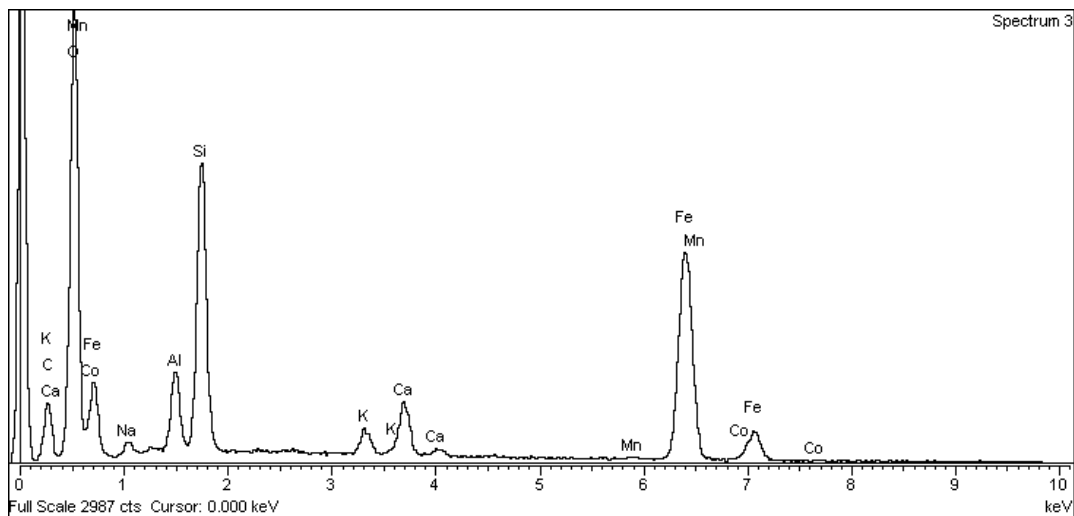


Figura 4.23. Análisis textural (A) y geoquímico (B) de la fase mineral cementante de los granos de grava de la base de la columna de serrines de granito.

Del análisis composicional se interpreta que la fase cementante está formada por oxi-hidróxidos de hierro y manganeso (hardpans). Esta mineralización ha sido reconocida en trabajos previos con serrines de granito (Vázquez, 2005; Delgado *et al.*, 2006; Barrientos *et al.*, 2010), así como durante el Ensayo de Hidratación, Deshidratación y Envejecimiento en Serrines de Granito correspondiente al Capítulo 3 del presente trabajo.

La presencia de estos minerales guarda relación con la oxidación de la granalla de acero presente en los serrines de granito, cuya procedencia está vinculada a los procesos de corte y pulido empleados en los talleres de elaboración de la piedra natural.

La reducción de la porosidad de la capa de grava, se traduce en un descenso del volumen útil para el drenaje y, por consiguiente, en un descenso de la permeabilidad del material. Este hecho explica la tendencia decreciente de la conductividad hidráulica en la columna del modelo, observada en la Figura 4.22. El gradiente asociado a este descenso en la conductividad, estimado en $-5 \cdot 10^{-13} \text{ m s}^{-2}$, ofrece una idea aproximativa del efecto de la precipitación de hardpans en las propiedades hidráulicas del sistema.

Desde el punto de vista geoquímico, la grava original se ha convertido en un filtro natural para mejorar la calidad de aguas con metales en disolución y otros contaminantes susceptibles de reducción electroquímica.

4.3 TANQUE DE ELECTRODOS: ENSAYO 3

El ensayo desarrollado en el tanque de electrodos (ENSAYO-3) evalúa el flujo de agua a través de los serrines de granito, a partir de su respuesta eléctrica inducida por una diferencia de potencial impuesta desde el exterior. Los serrines fueron vertidos, compactados y muestreados en el interior de la columna de ensayo, siguiendo la secuencia descrita en el apartado 3.1, alcanzándose las condiciones iniciales de ensayo (Tabla 4.1). En este caso, los serrines presentan unas propiedades físicas intermedias entre las del ENSAYO-1 y el ENSAYO-2, con una porosidad y contenido volumétrico en agua medios de 0.57 y $0.27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente.

El proceso constructivo finalizó con la hincada de los electrodos hasta una profundidad de 2 cm, desde el perímetro del dispositivo experimental. La ubicación quedó prescrita por orificios previamente perforados en la columna de PVC, que obedecen a la configuración geométrica dipolo-dipolo definida, específicamente, para este tipo de columnas (Günther *et al.*, 2006).

Al finalizar la construcción del ensayo, tuvo lugar el inicio del proceso de hidratación. La columna de serrines fue regada desde su zona superior, efectuándose un registro continuo de su respuesta eléctrica.

El ensayo, que se prolongó durante 86 días, constó de dos ciclos de hidratación, separados por un periodo de secado no forzado por evaporación, de acuerdo con las condiciones ambientales del laboratorio. En este capítulo tan sólo se abordará el primer ciclo de hidratación.

En el momento de redactar esta memoria, la columna se encuentra sometida a un nuevo ciclo de secado, tras el que se desarrollará un estudio relativo al envejecimiento de los serrines de granito, y con el que se intentarán establecer las posibles relaciones entre los resultados obtenidos en el segundo ciclo de hidratación y los cambios texturales reconocidos durante el desmantelamiento del modelo experimental.

4.3.1 BALANCE HÍDRICO

La hidratación del material se llevó a cabo mediante vertidos puntuales desde la zona superior de la columna. La evaporación calculada y los lixiviados contabilizados, completan el balance hídrico del ensayo (Figura 4.24).

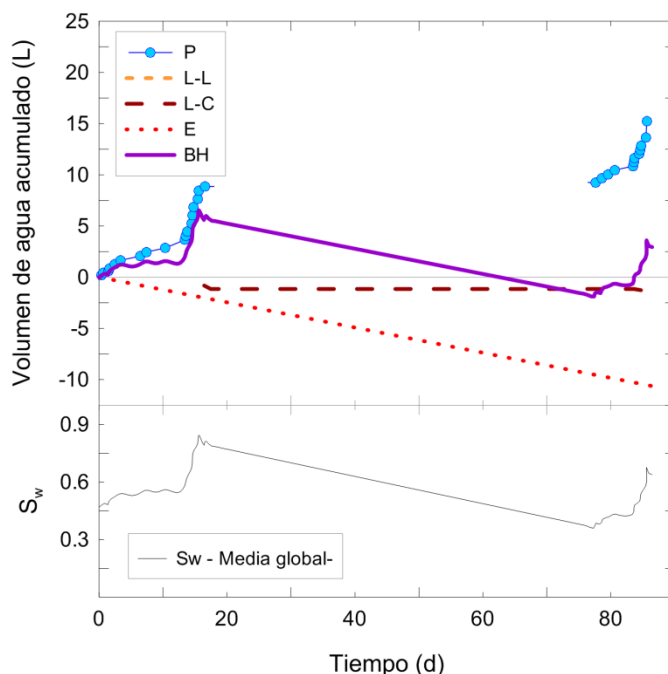


Figura 4.24. Balance hídrico simulado durante el ENSAYO-3: *P*, agua vertida; *L – L*, lixiviados laterales; *L – C*, lixiviados centrales; *E*, evaporación; *BH*, balance hídrico; S_w , evolución del grado de saturación global de la columna de serrines de granito.

En el balance hídrico se observan los dos ciclos de hidratación desarrollados, interrumpidos por un periodo sin aportación (~2 meses), durante el cual se produjo la deshidratación natural de los serrines por evaporación.

La fuerte tasa de evaporación estimada en el laboratorio de ensayo ($\sim 1.74 \text{ mm d}^{-1}$), rebajó el grado de saturación alcanzado en el primer ciclo de vertido hasta un valor similar al de las condiciones iniciales de ensayo, durante este periodo de secado no forzado.

En el primer ciclo de hidratación, el grado de saturación medio teórico de la columna alcanzó un valor de 0.7. Este ciclo concluyó al aparecer los primeros lixiviados en la zona inferior de la columna. A pesar de estar equipada con colectores laterales y centrales, los lixiviados recolectados tuvieron una única procedencia (central) en los dos ciclos de hidratación.

4.3.2 EVOLUCIÓN DEL ESTADO DE SATURACIÓN DE LA COLUMNA

Los datos de resistividad eléctrica ($\Omega \text{ m}$) obtenidos por SIPLab, fueron empleados en la determinación de la humedad de la columna de serrines de granito durante el transcurso del ensayo. La conversión de los datos comienza con la transformación de los valores de

resistividad a conductividad eléctrica ($\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$), la cual permite obtener valores de humedad a partir de la relación empírica propuesta por Archie (1942).

Tal y como se introdujo en el apartado 4.2 del Capítulo 3, los parámetros de ajuste de la ley de Archie en serrines de granito se estimaron a partir de un proceso de calibración de la respuesta eléctrica del material sobre muestras compactadas bajo condiciones próctor normal (ver Anexo I.B).

La aplicación de la ley de Archie precisa conocer la conductividad eléctrica del agua intersticial del medio, cuya determinación es complicada cuando el contenido de humedad es bajo. Con el fin de obtener este valor, se extrajo agua intersticial con muestreadores Rhizon, una vez se consideró que la columna de serrines había alcanzado su grado de saturación máximo (relacionado con la aparición de los primeros lixiviados). En estas condiciones, el material presenta una capacidad de retención mínima (capacidad de campo \sim -15 kPa), lo cual facilita la extracción.

Desde la zona superior de la columna se insertaron extractores Rhizon en el material por incrementos de 5 cm, hasta una profundidad máxima de 35 cm. Los datos fueron ajustados linealmente ($r^2=0.99$), lo cual permitió estimar un valor de la conductividad eléctrica del agua intersticial para cada profundidad en la columna, ponderado para la cantidad de agua vertida en torno a una conductividad promedio de 1.8 mS cm^{-1} .

Una vez determinada la conductividad eléctrica del agua intersticial, se estimó el valor de la conductividad eléctrica en cada punto de la columna de serrines, a partir de las condiciones iniciales de ensayo determinadas durante la construcción (Tabla 4.1). Para ello empleamos la expresión de Archie (1942), calibrada para los serrines de granito (ecuación e.3.11)

Los valores teóricos obtenidos fueron comparados con los observados durante el primer ciclo de medida de SIPLab, lo cual permitió aplicar un factor de corrección a cada punto de la columna y normalizar las medidas respecto del valor teórico inicial. Este factor de corrección obedece a los leves desplazamientos en la posición de los electrodos durante el montaje del dispositivo, respecto de la configuración programada en SIPLab.

La Figura 4.25 muestra una representación en 2D y 3D, del grado de saturación inicial presentado por la columna de serrines de granito. Un corte de 160° descubre la zona central del cilindro para facilitar la visualización 3D, mientras que a partir de tres secciones transversales situadas a cota -0.1, -0.15 y -0.2 m (considerando la superficie de la columna como la cota 0 m), se evalúa la distribución del grado de saturación en 2D.

Las gráficas de la Figura 4.25 muestran las condiciones iniciales del ensayo, resultado de la primera medición llevada a cabo en el tanque de electrodos y la aplicación del factor de corrección. Al inicio del ensayo, la columna presenta un grado de saturación promedio de 0.45.

El análisis de la evolución de la distribución del grado de saturación en la columna se abordó a partir de los datos registrados en cinco de las etapas de aportación, en secuencia de

hidratación creciente. Considerando la duración de cada ciclo de medida (58 min), aquellas que siguen a los primeros vertidos muestran resultados confusos y no concluyentes, debido al solapamiento entre la realización de la secuencia de medidas, la posición del par de electrodos implicado y el avance del flujo.

Tras analizar los datos en los ciclos de medida posteriores a las etapas de vertido, se decidió que las medidas no debían realizarse durante las 3 h siguientes al comienzo del vertido, ya que en ese momento es cuando se alcanzaban las condiciones más representativas del sistema. De forma más precisa, se compararon los datos entre ciclos para reconocer el de mayor semejanza con el consecutivo, como señal de estabilización del sistema.

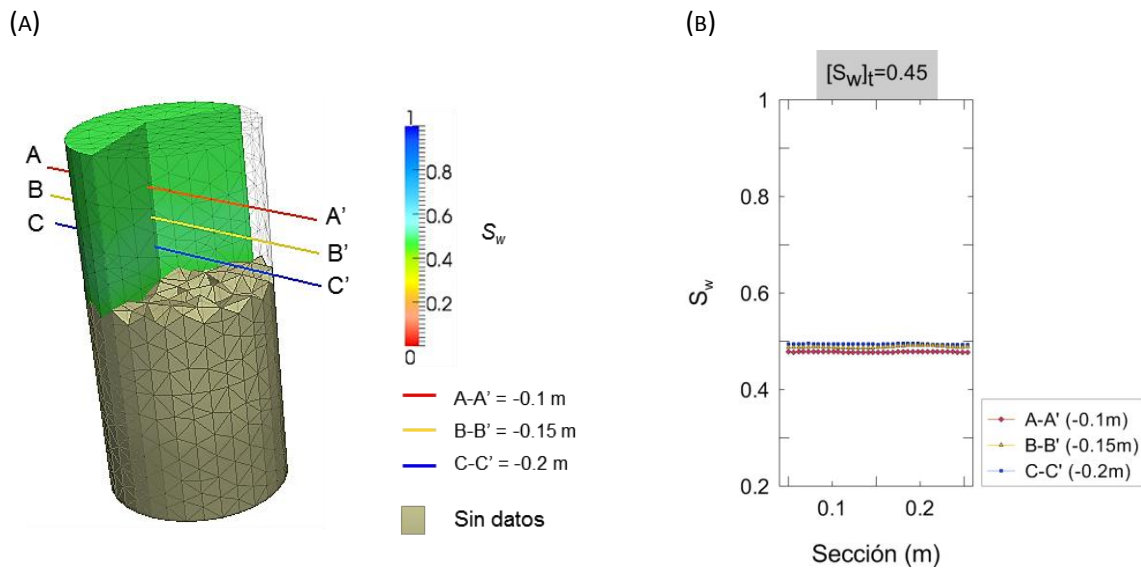


Figura 4.25. Condiciones iniciales del ENSAYO-3. (A) Representación 3D del grado de saturación de los serrines de granito en la zona de estudio (0-0.25 m de profundidad) y posición de cortes transversales a cota -0.1, -0.15 y -0.2 m; (B) Representación 2D de las secciones transversales.

La evolución del grado de saturación en la columna se representa en la Figura 4.26-A mediante la visualización 3D en cinco de los episodios de aportación de agua. En ella, las imágenes muestran heterogeneidad en la distribución de la saturación de la columna, para todos los estadios evaluados. Las zonas centrales presentan una hidratación más alta, durante los primeros estadios, que las zonas superficiales. Este fenómeno puede ser interpretado como un avance rápido del flujo hacia zonas inferiores de la columna tras el vertido; aunque, por otra parte, puede deberse a la influencia de la evaporación en zonas superficiales, cuyo efecto es más acusado en estadios de baja hidratación. Es plausible también la combinación de ambas hipótesis.

A medida que avanza el ensayo, se observa un incremento general del grado de saturación en la columna y la aparición de zonas preferentemente más hidratadas. La región más somera y ciertas partes en los contornos, muestran un grado de saturación superior al de las zonas centrales de la columna. La distribución heterogénea del grado de saturación se puede

interpretar como el resultado del avance, a distinta velocidad, del frente de saturación. Dicha anisotropía del flujo explotaría eventuales vías preferenciales para el movimiento del agua.

Este efecto de flujo preferencial resulta interesante dado que, aun tratándose de materiales de grano fino y habiendo puesto especial cuidado en la homogenización, es muy difícil evitar el desarrollo de anisotropías distintas a las esperables en el contorno del dispositivo experimental.

Los dos estadios finales muestran un encharcamiento en la zona superior de la columna, coincidente con la infiltración, más lenta, observada durante los escalones de vertido correspondientes. La escasa diferencia entre los ciclos de medida representados en cada caso respecto al anterior (-1 h) y posterior (+1 h), sugiere que el avance del flujo está condicionado por la presencia de caminos preferenciales desarrollado en el material durante la construcción o ejecución del propio ensayo.

La hipótesis de la presencia de caminos preferenciales en el interior de la columna es abordada con mayor detalle mediante el análisis 2D del grado de saturación, en cada uno de los estadios de hidratación evaluados (Figura 4.26-B). Para ello, hemos realizado tres secciones horizontales a distinta cota, las cuales cortan la columna de ensayo por su zona central (ver Figura 4.25).

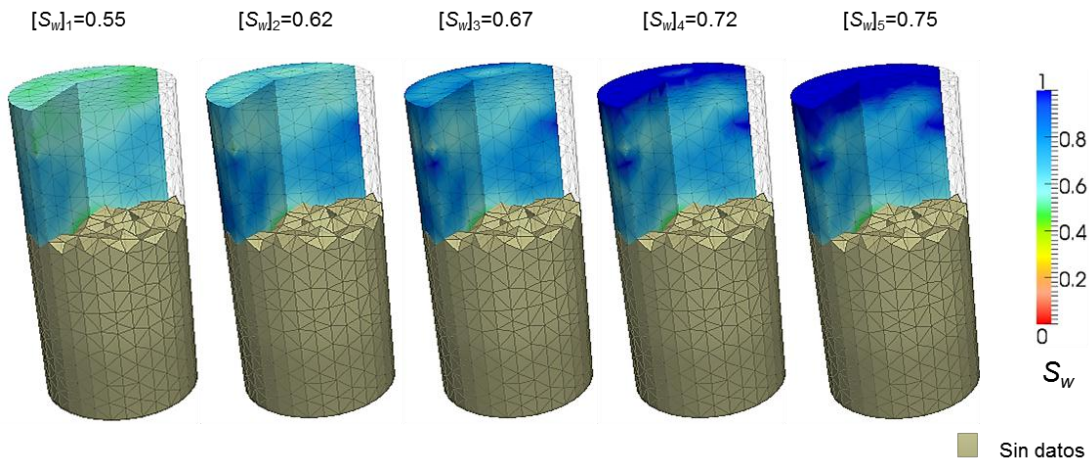
El perfil situado en posición más somera (A-A') muestra la distribución más regular del grado de saturación, con independencia del estadio de hidratación evaluado. A esta cota, S_w aumenta de forma homogénea a lo largo del perfil, y de forma progresiva conforme se añade agua al sistema. Finalmente, la columna alcanza en esta cota un valor medio final $S_w \sim 0.7$.

Los perfiles B-B' y C-C', presentan una distribución de la saturación con dos frentes abruptos localizados en zonas cercanas a los contornos laterales. Esta tendencia se acentúa conforme crece la saturación con el tiempo, hasta alcanzar valores máximos en el tercer estadio de hidratación evaluado. La hincada de los electrodos puede ser la causa del incremento parcial del grado de saturación en los bordes como resultado de la compactación local inducida por la punta de los mismos sobre el material. Este efecto sería análogo al efecto de borde asociado a la penetración de pilotes (Ruge y Lizcano, 2005)

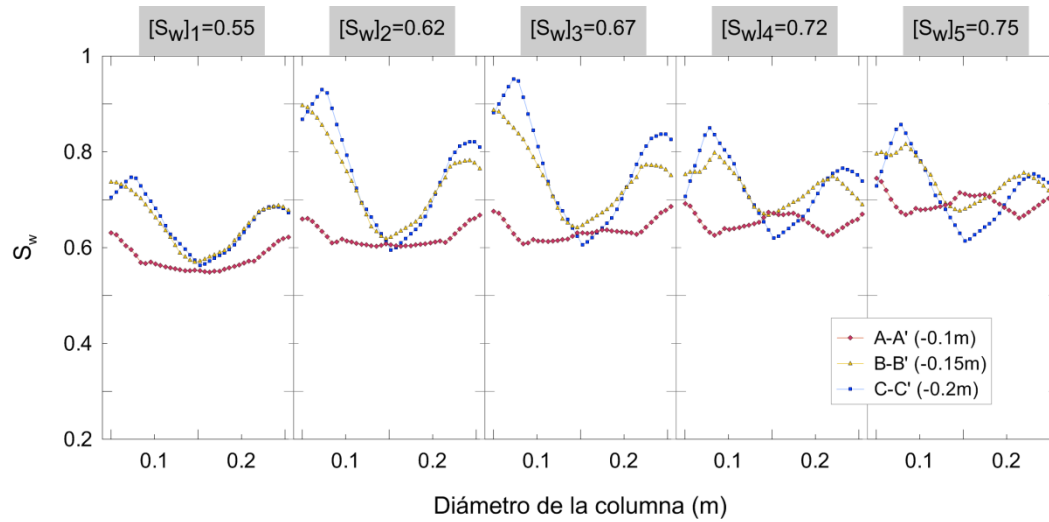
En los dos últimos estadios se observa cómo la columna evoluciona hacia la estabilización del grado de saturación en torno a un valor promedio de 0.7, en todos los perfiles. Los frentes preferenciales continúan estando bastante marcados, pero su dispersión respecto al valor promedio de la sección disminuye.

El último estadio representa el momento de máxima hidratación alcanzado por la columna, el cual es previo a la aparición de los primeros lixiviados. En él observamos como el material permite la retención de agua hasta un grado de saturación máximo de 0.7, que en términos de contenido volumétrico en agua equivale a un 39%. Coherentemente con lo visto en el ENSAYO-1 y el ENSAYO-2, este valor marca la capacidad de campo de los serrines de granito.

(A)



(B)



(C)

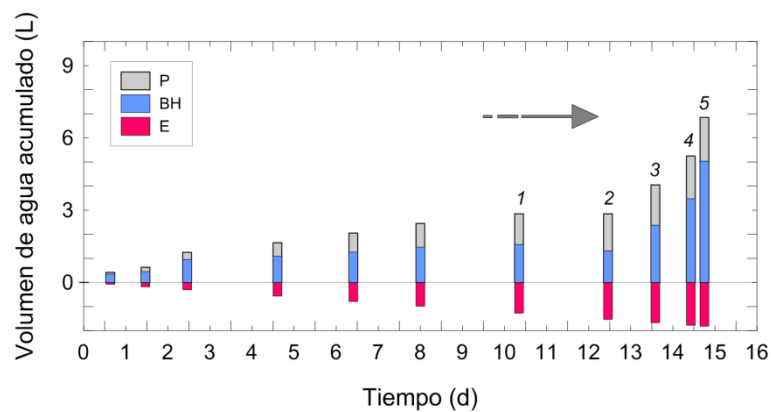


Figura 4.26. Evolución del avance del frente de saturación. (A) Distribución del grado de saturación en el tanque de electrodos durante una secuencia de hidratación creciente, definida por el grado de saturación teórico medio, $[S_w]_i$, presentado por la columna experimental. (B) Secciones transversales 2D de los planos horizontales situados a cota -0.1, -0.15 y -0.2 m, respectivamente. (C) Balance hídrico puntual con numeración en los estadios $[S_w]_i$: P , agua aportada; BH , balance hídrico; E , evaporación.

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los distintos experimentos de flujo realizados con serrines de granito compactados y no saturados, han permitido determinar algunos parámetros hidráulicos del material a las condiciones de ensayo, evaluar la utilidad de diversas metodologías para el estudio y la caracterización de estos materiales, así como reconocer cambios desencadenados como resultado del desarrollo de distintos procesos fisicoquímicos (p.ej. cementación).

Las condiciones de ensayo quedaron determinadas por las dimensiones y las características de los dispositivos experimentales. Las herramientas empleadas durante la construcción y seguimiento, repercutieron en la evolución de las propiedades físicas del material a la escala de trabajo, adquiriendo especial importancia el efecto de la compactación en las condiciones iniciales de ensayo. La falta de resistencia de los dispositivos experimentales empleados impidió el uso de técnicas de compactación más eficientes, a priori. Ello influyó en los valores de las distintas propiedades hidráulicas estimadas, limitando los resultados alcanzados a las condiciones de ensayo impuestas.

5.1 APLICABILIDAD DE LAS DISTINTAS TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

Los experimentos desarrollados han permitido abordar la hidratación de los serrines de granito mediante técnicas instrumentales de diversa naturaleza (intrusiva y no intrusiva), bajo condiciones de ensayo controladas. Durante la construcción se llevó a cabo el muestreo *in situ* del material, estableciéndose las condiciones iniciales para cada uno de los ensayos. Mediante los balances hídricos impuestos se determinó la evolución global del estado de saturación del material, la cual fue comparada con los datos registrados por medio de diversos equipos: sondas de capacitancia y psicrómetros, y sistema de electrodos, según el caso.

Las sondas de capacitancia han mostrado registros coherentes con las condiciones de hidratación simuladas. La eficacia de los sensores es mayor cuanto menor es la humedad del suelo, siendo en estados cercanos a la capacidad de campo del material cuando aparecen los mayores problemas de interpretación. Los datos de carácter puntual proporcionados por este tipo de sensores pueden no ser representativos del conjunto muestreado, en particular cuando el sistema se encuentra próximo a la saturación. Las dimensiones físicas de la sonda empleada (ECHO EC-5) limitan la medida a una escasa porción de suelo, el cual se encuentra parcialmente aislado por las puntas de medición del sensor. Las variaciones de humedad generan cambios en la succión del suelo, provocando un reajuste interno de presiones. Cuando el contenido de humedad es alto, las diferencias de succión entre dos estados de saturación son muy bajas, ralentizándose la homogenización de humedades en el sistema. Las zonas aisladas serían las más susceptibles de sufrir este fenómeno, lo cual puede explicar la escasa respuesta de los sensores de capacitancia ante variaciones de humedad cuando la saturación es alta.

Los psicrómetros empleados en la determinación de cambios de succión en el material, han respondido a la llegada del frente de saturación, en los casos en que la humedad inicial del material fue baja. Debido a la precisión y rango de medida para el cual han sido diseñados, estos sensores no permiten establecer relaciones prácticas entre succión y humedad. Su empleo en los ensayos ha servido para identificar el momento en el que se produce la llegada del frente de hidratación a la profundidad de ubicación del sensor, ayudando a corroborar los datos registrados por las sondas de capacitancia. Los psicrómetros resultan ineficaces en la determinación de la succión o variaciones de succión, en suelos con humedad elevada. Su empleo, en condiciones de baja humedad, permite reconocer tendencias en la hidratación cuando el cambio es progresivo, aunque los resultados deben tratarse como indicativos del comportamiento del sistema y no como valores absolutos de la succión presentada por el medio.

La ventaja principal del método eléctrico respecto a otro tipo de técnicas de muestreo es su carácter no intrusivo en el medio estudiado. No obstante, ésta característica debe ser matizada debido a que el hecho de hincar los electrodos en el material es, en sí mismo, un proceso intrusivo. En este sentido, a pesar de que la penetración de los electrodos en el material de nuestro experimento resultaba muy baja (2 cm) respecto del volumen total evaluado, afectando sólo a los contornos, se reconocieron estructuras interpretables como el efecto de borde por compactación local asociada a la hinca.

Una vez calibrada la respuesta eléctrica de los serrines de granito, el empleo de esta técnica permitió reconocer el comportamiento natural del material, en las condiciones de ensayo. El método eléctrico, empleado en serrines de granito, ha resultado una eficaz herramienta para reconocer las propiedades intrínsecas del material en 3D. Los datos registrados han permitido llevar a cabo un estudio de la evolución del grado de saturación en serrines a pequeña escala, bajo procesos de hidratación controlada, con resultados coherentes con los calculados de forma teórica a partir del balance hídrico impuesto en el ensayo.

Durante el estudio experimental con el método geoelectrico, se han reconocido estructuras internas de avance preferencial del frente de saturación. Un reparto heterogéneo de la humedad del material a muy pequeña escala o la compactación diferencial del mismo durante la construcción e hinca de electrodos, han podido propiciar digitaciones gravitatorias en el flujo (*gravity fingers*), a las cuales se asociaría la formación de vías preferenciales de flujo en los estadios tempranos de hidratación (Glass y Yarrington, 1996). Sin embargo, las estructuras de flujo preferencial reconocidas en la columna de ensayo se van viendo atenuadas conforme aumenta el grado de saturación del material, lo cual se traduce en un efecto de homogenización del avance del flujo a través del mismo.

Los resultados obtenidos con el método geoelectrico en serrines de granito convierten esta técnica en un método de caracterización de gran interés en ensayos de laboratorio y campo. La sencillez de la técnica, su carácter no contaminante en el sistema estudiado (no intrusivo o

cuasi-no intrusivo), su alta resolución espacial o sus reducidos costes, son características que contrastan con la gran calidad de la información reportada.

5.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN SERRINES DE GRANITO

Los ensayos han permitido determinar dos parámetros hidráulicos de gran interés en relación con el potencial uso de los serrines de granito como barreras de impermeabilización y sellado: la conductividad hidráulica y la capacidad de campo. Ambos parámetros han sido estimados contrastando las observaciones sobre la hidratación controlada, los registros de los sensores y la modelización numérica.

Las condiciones experimentales para cada uno de los ensayos fueron cuidadosamente monitorizadas, lo cual permitió conocer el estado de hidratación del material en cada instante. Del cálculo del balance de agua en el sistema y el conocimiento de las condiciones iniciales, hemos deducido la evolución del grado de saturación de los serrines en cada uno de los ensayos. La aparición de los lixiviados, que interpretamos como la manifestación del máximo grado de saturación alcanzable por el material bajo las condiciones de ensayo, nos ha permitido aproximar su máxima capacidad de retención de agua (capacidad de campo).

Los resultados sugieren que la capacidad de campo de los serrines de granito es de ~39% (como contenido volumétrico de agua). Para contenidos mayores, el material es incapaz de retener más agua y ésta drena por gravedad. El grado de saturación asociado a la capacidad de campo guarda relación directa con la porosidad del material la cual, a su vez, es función del grado de compactación.

La capacidad de un suelo para transmitir el agua (conductividad hidráulica), está relacionada también con el grado de compactación. Su valor, expresado en términos de conductividad hidráulica saturada, es función del grado de humedad presentado por el suelo y sus características texturales (Green y Corey, 1971).

La determinación de la conductividad hidráulica saturada llevada a cabo en serrines de granito, bajo condiciones de compactación de laboratorio (maza próctor modificado), muestra valores superiores a $1 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, coherentes con los valores indicados por Barrientos (2007), obtenidos en ensayos de campo en un vertedero de serrines de granito. Sin embargo, mientras los serrines no se encuentren saturados, la transferencia de agua estará limitada por la capacidad de campo del material. La conductividad hidráulica bajo estas condiciones es menor que la que presentada en estado saturado ($\sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$). Por lo tanto, basándonos en los resultados experimentales obtenidos, siempre y cuando exista un sistema de drenaje que impida la saturación, dentro del rango de compactación alcanzado, las capas de serrines de granito tendrán valores de conductividad hidráulica en el rango de 10^{-8} m s^{-1} mientras permanezcan en condiciones de humedad inferiores a la capacidad de campo ($\theta \sim 39\%$). La conductividad hidráulica será previsiblemente inferior, si se emplean técnicas de compactación más eficaces.

5.3 REPERCUSIÓN DEL LAVADO DE SERRINES DE GRANITO EN EL MATERIAL DE CONTORNO

En los ensayos realizados empleando los cilindros de metacrilato como dispositivo experimental, se dispuso una capa de grava como lecho drenante. Sobre ella, fueron compactadas las distintas capas de serrines de granito.

Debido al flujo inducido por la hidratación, a la fracción fina de la granulometría del material y su reactividad, se produjo un lavado que en el experimento de mayor duración (cuatro meses, ENSAYO-2) que condujo a la cementación parcial de los cantos de grava. Tras ser analizada en detalle mediante SEM-EDX, se reconoció la presencia de oxi-hidróxidos de hierro, probablemente *green rust*.

Este cemento propicia la formación de costras (*hardpans*), cuyo papel en el comportamiento de los serrines es doble: por un lado, inducen un incremento en la rugosidad de las capas afectadas, aumentando su cohesión intergranular; por otro, son susceptibles de retener metales transportados en disolución (u otro tipo de contaminantes susceptibles de sorción) en su estructura, actuando como filtros de aguas contaminadas.

Además, la cementación de los granos de grava tiene un efecto directo en el rendimiento hidrodinámico del sistema, dado que su formación, ocupando parte del espacio poroso, provoca una disminución progresiva de la conductividad hidráulica. Esto ha podido ser deducido a partir de los experimentos realizados.

Nuestros ensayos han constatado, asimismo, que la formación de estos oxi-hidróxidos en el interior de la columna de serrines no da lugar a los procesos expansivos apuntados por Barrientos (2010), lo cual es positivo. El análisis de las costras en la columna permitió vincular su formación a las zonas aireadas de contacto serrines-grava, mientras que en las zonas internas de los serrines de granito no se apreció este tipo de mineralización. Esto limita el efecto de la formación de costras al incremento en la cohesión y rozamiento entre las capas serrines-grava, y al desarrollo de filtros geoquímicos naturales para mejora de la calidad de aguas.

CAPÍTULO

5

DISPOSITIVO DE BARRERA CAPILAR CON SERRINES DE GRANITO

1 Introducción	117
1.1 Funcionamiento de las Barreras Capilares	118
2 Objetivos Particulares del Ensayo	119
3 Instrumentación	119
4 Materiales y Métodos	121
4.1 Selección del Método de Compactación y Procedimiento de Muestreo	121
4.2 Construcción	126
4.3 Propiedades de los Materiales	128
4.4 Ejecución de los Ensayos sobre la Barrera Capilar	130
5 Resultados	133
5.1 Experimento de Hidratación con una Secuencia de Precipitación Realista	133
5.2 Experimento con Ciclos Hidratación-Aireación	136
5.3 Interpretación de los Resultados	140
6 Principales Conclusiones del Ensayo	142

1 INTRODUCCIÓN

Los experimentos con serrines de granito en estado no saturado, en los cuales se han estudiado procesos de hidratación controlada y monitorizados con herramientas para el control de humedad en suelos (Capítulos 3 y 4), han puesto en evidencia distintas propiedades de estos materiales bajo las condiciones de ensayo impuestas.

En particular, las propiedades hidráulicas relacionadas con su uso como barrera de impermeabilización y sellado, contrastan con las observadas por otros autores a partir de ensayos geotécnicos convencionales a pequeña escala (Vázquez, 2005; Navarro *et al.*, 2008; Barrientos *et al.*, 2010). Entre las diferencias más significativas se encuentra la elevada conductividad hidráulica saturada que hemos obtenidos en nuestros ensayos.

La construcción de los dispositivos descritos en los Capítulos 3 y 4, se desarrolló mediante el uso de técnicas de compactación manual, menos eficientes que las empleadas habitualmente en ingeniería civil (vibrocompactadoras, compactadoras neumáticas, bandejas vibrantes, etc.). Pese a existir equipos de compactación relativamente ligeros, su uso en el laboratorio está condicionado por las dimensiones físicas del dispositivo experimental. Este debe ser robusto y con resistencia suficiente como para soportar tanto el peso de los materiales empleados como las acciones dinámicas de las máquinas de compactación.

Con el fin de estudiar el comportamiento de los serrines a escala cuasi-real, diseñamos un modelo reducido con el que analizar el comportamiento hidromecánico de barreras construidas con materiales finos. El diseño del dispositivo (*ES-2345472-B1*) ha sido objeto de una patente de invención (Juncosa *et al.*, 2011). El dispositivo se basa en un recinto de confinamiento de hormigón armado. Se trata de un prisma de base cuadrada de 4.4 m² abierto a techo y muro, suspendido sobre un entramado metálico. El dispositivo está equipado con un sistema de riego automatizado (lo cual permite la simulación de condiciones cuasi-reales de precipitación) y diferentes sensores para control de humedad del material ensayado. Por último, la base del dispositivo cuenta con un sistema de colectores para captar los lixiviados generados en distintos puntos del dispositivo.

El dispositivo permite trabajar con volúmenes importantes de material (varios m³) y someterlo a procesos de compactación, empleando maquinaria de obra. Las condiciones iniciales de ensayo alcanzables con este tipo dispositivo son equivalentes a las de una obra a escala real. La polivalencia del dispositivo permite estudiar, en su interior, múltiples configuraciones de barrera o cualquier otra estructura en la que deban disponerse capas de material.

Los experimentos descritos en los Capítulos 3 y 4 demuestran que, si bien los serrines de granito tienen una cierta capacidad para actuar como barrera de impermeabilización y/o sellado, aun siendo compactados bajo condiciones razonables (próctor normal/modificado), no se reduce el flujo a través de ellos como cabría esperar de este tipo de materiales (limos). Es evidente que siempre puede mejorarse el diseño de un sistema basado en una barrera de

serrines, incorporando algún tipo de material sintético (p.ej. geotextiles o geomembras). No obstante, la hipótesis de trabajo original consideraba el uso único de serrines con el fin indicado.

Reconociendo las limitaciones hidráulicas del material, hemos intentado mejorar su rendimiento con una configuración basada en las propiedades de las barreras capilares. Esta aproximación nos permite, al mismo tiempo, probar el funcionamiento del dispositivo experimental descrito en los párrafos anteriores.

1.1 FUNCIONAMIENTO DE LAS BARRERAS CAPILARES

La capacidad impermeabilizante de las barreras capilares es el resultado del contraste entre las propiedades hidráulicas de capas con distinta granulometría superpuestas, cuya interfaz provoca un efecto de impedancia en la conductividad hidráulica que condiciona el movimiento del agua a través de la barrera (Khire *et al.*, 2000).

La continuidad del sistema, en términos de presión de poro, exige que la succión de los materiales presentes en la barrera capilar sea constante en su interfaz. Por tanto, al situar una capa de finos sobre otra de material más grosero, el agua fluirá hacia la capa inferior cuando en el material fino se reduzca la condición de succión impuesta por el material grueso.

El descenso de la succión del material fino está relacionado con el incremento de su contenido en agua. La impedancia hidráulica provocada por la interfaz de la barrera capilar causa un efecto tapón en la infiltración, almacenándose el agua infiltrada en la capa de finos hasta alcanzar el grado de humedad con el cual se igualan las succiones entre ambos materiales.

Durante ese tiempo, el sistema puede no desarrollar la condición impuesta desde la capa inferior debido a fenómenos de aireación natural, como la evapotranspiración, o por la existencia de sistemas de drenaje efectivos. En relación con el efecto drenante, la geometría de la interfaz condiciona el movimiento del agua a través de la capa de materiales finos. Cuando la interfaz es una superficie plana inclinada, mientras la capacidad de almacenamiento del material fino así lo permita, el flujo discurrirá paralelamente a dicha interfaz con flujos gobernados por la conductividad hidráulica no saturada de la capa de finos. Si, en su avance, el agua alcanza una zona de drenaje, la barrera capilar se comportará como un efectivo dispositivo colector de aguas de infiltración.

En resumen, existen varios factores que condicionan el rendimiento de una configuración de barrera capilar: i) el contraste entre el comportamiento hidráulico de las capas empleadas, superpuestas; ii) la capacidad de almacenamiento de la capa superior (determinada por sus propiedades físicas y su espesor); iii) una conductividad hidráulica no saturada en la capa superior que permita el flujo para un rango de humedad alto; iv) una pendiente de interfaz que favorezca el flujo y no el almacenamiento; v) un buen sistema de drenaje hacia el exterior del sistema; vi) potencia de la capa de grano grueso inferior, que mejora el rendimiento de la barrera cuanto mayor sea su espesor medio y menor su humedad (Qian *et al.*, 2010).

Entre los distintos materiales propuestos en la literatura para uso en barreras capilares, los materiales limosos de baja plasticidad (el caso de los serrines de granito), aparecen como los más ventajosos en muchos de estos sentidos (Aubertin *et al.*, 2009). Este tipo de materiales permite establecer un buen par retención-conductividad hidráulica, favoreciendo el buen funcionamiento de los dispositivos de barrera capilar, incluso para geometrías de interfaz con baja pendiente.

2 OBJETIVOS PARTICULARES DEL ENSAYO

Este ensayo se desarrolló con una vocación explícita de demostración. Dicha demostración iba dirigida hacia los siguientes aspectos:

- ◆ Verificar el funcionamiento del sistema experimental, en condiciones de trabajo cercanas a las de la escala de trabajo real en obra civil.
- ◆ Determinar el método de compactación más eficaz en serrines de granito, empleando maquinaria de obra convencional.
- ◆ Evaluar la viabilidad del uso de serrines de granito como material fino para la retención y canalización del agua de infiltración, en una configuración tipo barrera capilar.

3 INSTRUMENTACIÓN

El ensayo de barrera capilar con serrines de granito compactados se ejecutó sobre el dispositivo experimental que descubrimos a continuación. Este dispositivo (Figura 5.1) consta de varios elementos diferenciables en función de su cometido: i) los elementos de soporte y confinamiento (encargados de soportar tanto el peso propio del material como el efecto dinámico de la compactación durante la puesta en obra de los ensayos); ii) el sistema de riego y recogida de lixiviados, con los cuales se establece el balance hídrico del ensayo; iii) los equipos para el control de humedad-succión en suelos, ubicados en el material objeto de estudio.

El recinto de confinamiento es una estructura de hormigón armado [1] de configuración cuadrangular con volumen útil de $\sim 7 \text{ m}^3$ [$l^2 \times H$], hueco y abierto tanto superior como inferiormente. La estructura descansa sobre pilares de acero que lo elevan respecto a la solera o superficie de apoyo hasta una altura de 0.4 m [S]. Su superficie interna está revestida con una lámina de neopreno de 2 cm de grosor, con la cual se evitan eventuales pérdidas por filtración a través de las paredes porosas de la estructura de hormigón. El neopreno, además, confiere al material compactado un cierto empuje lateral y minimiza la circulación preferencial

de flujo a través de la interfaz material/recinto. Con el mismo propósito, las aristas interiores del recinto fueron redondeadas, lo cual favorece también las tareas de compactación.

(A) VISTA INTERIOR

(B) VISTA EXTERIOR

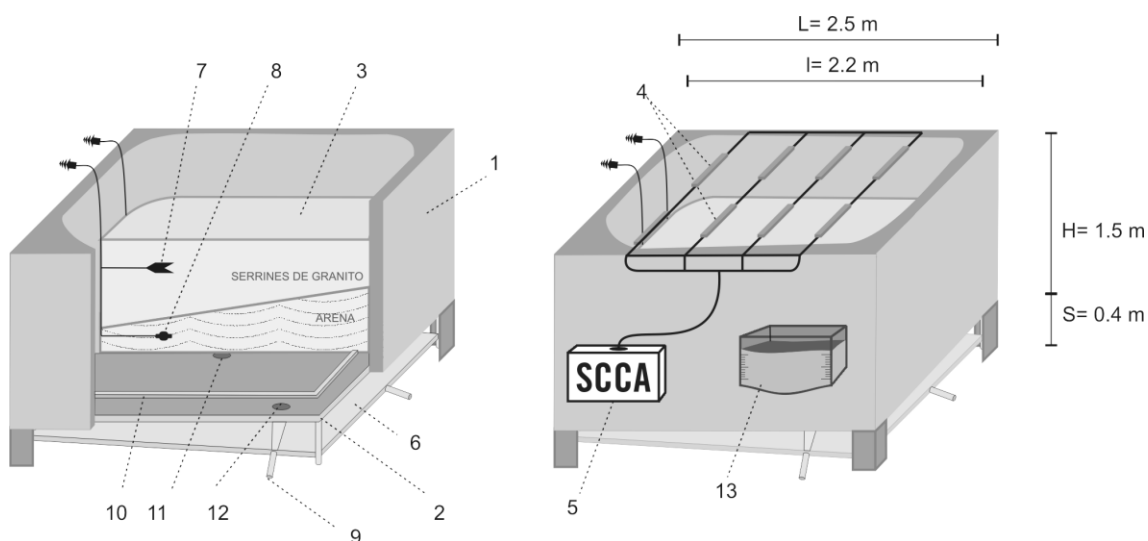


Figura 5.1. Dispositivo experimental ES-2345472-B1: (a) vista interior, (b) vista exterior. [1] Estructura de hormigón armado (recinto de confinamiento); [2] Bastidor de soporte (trámex sobre estructura metálica); [3] Material compactado; [4] Tubos nebulizadores de agua; [5] Sistema automatizado de control de caudales (SCCA); [6] Bandeja para la recogida de lixiviados; [7] Sondas de humedad; [8] Psicrómetros; [9] Colector para lixiviados laterales; [10] Elemento separador de regiones de lixiviación; [11] Desagüe central; [12] Desagüe lateral; [13] Evaporímetro; [H] Altura; [L] Longitud externa; [l] Longitud interna; [S] Altura sobre solera.

La base interna de la estructura está conformada por una placa de hormigón armado dispuesto sobre un emparrillado metálico (trámex) [2]. Su área es análoga a la interior del dispositivo ($\sim 4.8 \text{ m}^2$), mientras que su altura es de 5 cm. La función de esta estructura es contener el material [3], soportar el proceso de compactación y repartir las cargas (estáticas y dinámicas). El almacén queda dividido en dos regiones mediante un marco [10], el cual permite canalizar los lixiviados hacia desagües específicos [11 y 12] para separar las aguas de filtración lateral (5 puntos de desagüe; [12]) y central (9 puntos de desagüe; [11]). Mientras que los lixiviados laterales son recogidos en colectores laterales [9], los lixiviados centrales vierten sobre una bandeja de acero ubicada bajo el emparrillado de la estructura [6].

Sobre el recinto de confinamiento se instaló un sistema de hidratación automatizado compuesto por un sistema de tubos, codos y válvulas (*Samarketing S.L. - Aqualife Nebusystem¹*), los cuales abastecen un total de 70 boquillas nebulizadoras de agua [4] uniformemente distribuidas, dotadas de elementos de sujeción o fijación al recinto, y filtros. La función de estas últimas es retener las posibles partículas arrastradas por el agua, impidiendo la oclusión de los orificios nebulizadores. El número de boquillas nebulizadoras garantiza un

¹ www.aqualife.com

reparto homogéneo de la precipitación sobre el material [3], minimizando la erosión de su superficie y las pérdidas de agua por proyección fuera del recinto de contención.

El caudal de agua suministrado por las boquillas nebulizadoras es controlado por un autómata programable (*SIEMENS, 6ES7214-1bd23*), el cual actúa sobre una electroválvula de regulación (*SAMSON 2001-3221*), que es, a su vez, asistida por un caudalímetro electromagnético (*MABECONTA, MID 100*). La programación del autómata se realiza desde una aplicación informática específica que traslada una secuencia de comandos de apertura/cierre a la electroválvula, permitiendo emitir caudales específicos a través del sistema nebulizador y simular secuencias pluviométricas definidas.

Los balances hidrológicos del dispositivo experimental, se completan con la información relativa a la tasa de evaporación, la cual se ha medido empleando un evaporímetro [13] ubicado en la pared externa del propio dispositivo experimental.

Una vez definidas las características y tipo de material a ensayar, éste es emplazado en el dispositivo e instrumentado para el seguimiento de las variables de control. En nuestro caso, hemos empleado sondas de capacitancia ECHO EC5 [7] ubicadas entre las capas de serrines, y psicrómetros [8] PCT-55-15-SF (Wescor Inc.), en la capa de arena.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo de la barrera capilar se ha desarrollado sobre el dispositivo descrito en la sección anterior. Con él, se pretende evaluar el comportamiento de los serrines de granito compactados como limitante del flujo cuando se combinan sus características retentivas con las de un material arenoso drenante. Para ello, se introdujeron secuencialmente ambos materiales, los cuales fueron compactados, muestreados e instrumentados. La interfaz que los separa se caracteriza por su geometría plana inclinada.

Tras la construcción de la barrera, se simularon determinadas condiciones de precipitación desde la zona superior de la misma, determinándose la evolución del frente de hidratación a través de los sensores instalados, y la cuantificación y procedencia de lixiviados (central y lateral).

En este apartado se describen los métodos de muestreo adoptados, las series pluviométricas simuladas y los datos registrados por los sensores, dando cuenta con detalle de los métodos de compactación empleados para cada material, el tratamiento previo de datos y las correcciones aplicadas, en cada caso.

4.1 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE COMPACTACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

La compactación consiste en la densificación de un material, empleando para ello medios mecánicos. Durante el proceso se modifican la fábrica y algunas de las propiedades del mismo, dando pie a unas mejoradas o nuevas del material en cuestión (Barrera *et al.*, 2004). Entre las

mejoras inducidas por la compactación está la reducción de la permeabilidad, lo cual es deseable de acuerdo con el uso previsto para los serrines de granito.

Es bien conocido, desde hace muchos años, que la compactación óptima requiere un cierto contenido de humedad, cuya finalidad es aumentar la cohesión intergranular. Sin embargo, un exceso de agua puede limitar la compactación, al disipar parte de la energía mecánica aplicada en la misma. Por ello, de forma convencional se refiere la compactación óptima a la aplicación de una cierta cantidad de energía a un material, cuyo contenido óptimo de humedad (de cara a la compactación) es propio y característico. Los ensayos próctor normal y modificado constituyen la aproximación más frecuente en geotecnia para evaluar la compactabilidad de suelos y, en nuestro medio serán utilizados como referencia.

El dispositivo experimental *ES-2345472-B1* permite trabajar con grandes cantidades de material (hasta 15 T), en múltiples disposiciones. No obstante, las dimensiones físicas del mismo, con una planta de $\sim 4.8 \text{ m}^2$, limita el tipo de maquinaria a compactadoras ligeras vibrantes o de impacto. Hemos descartado la compactación por presión al no tratarse de un sistema directamente aplicable en obra de grandes superficies.

Las compactadoras por vibración constituyen un método común de compactación en obra civil. En ellas, las placas en contacto con el suelo están acopladas a un mecanismo de masas excéntricas oscilantes que generan un efecto vibratorio. Su eficiencia en términos de compactación, según Barrera *et al.* (2004), está relacionada con la frecuencia empleada, la amplitud de vibración, el empuje dinámico de cada impulso del oscilador, el peso del equipo y la forma y tamaño del área de contacto.

La máxima eficacia en la compactación se consigue a humedades bajas y para materiales con una proporción de finos reducida. Ello es así porque para liberar el aire de los poros el mecanismo precisa superar la fricción interna entre los granos del material. En este sentido, el método es poco adecuado para materiales cohesivos, ya que puede resultar insuficiente para deshacer los grumos formados entre partículas.

Las compactadoras de impacto combinan el efecto de la percusión y el de la vibración. El resultado es la aplicación de una fuerza sobre una placa rígida, la cual transmite una presión al terreno de forma repetida. Son dispositivos adecuados para suelos cohesivos, permitiendo el desmenuzamiento de grumos, así como una rápida reducción del volumen de huecos.

Durante la realización de ensayos preliminares sobre el dispositivo *ES-2345472-B1*, empleamos los dos tipos de maquinaria descritos. Estos ensayos, de los que no se da cuenta en la presente memoria, fueron muy útiles a la hora de corregir el diseño inicial del dispositivo y reforzar sus puntos débiles.

De modo específico, las máquinas de compactación empleadas¹ fueron:

¹ Detalles técnicos: www.wackerneuson.com

- ◆ Bandeja vibratoria *Wacker-WPU 1550A Reversible Plates (15 kN / 500 mm)*.
- ◆ Vibroapisonador *Wacker- BS 60-2i 280mm/11in Shoe, Oil-injected Vibratory Rammer*.

La compactación se efectuó por tongadas de ~20 cm de espesor, aplicando energía por un periodo de tiempo no inferior a 30 min. La energía aplicada por la bandeja vibratoria es función de la frecuencia y amplitud de la excitación que se aplica, del tiempo de aplicación y de la sobrecarga que se coloca.

Por su parte, la cantidad de energía aportada con el vibroapisonador sobre una de estas capas fue de ~1200 kN m⁻². Esta ha sido determinada, a partir de las características físicas y mecánicas de la herramienta, mediante de la expresión matemática (e.5.1) que permite estimar la energía específica de compactación por impacto (Barrera *et al.*, 2004). Este valor se sitúa entre los valores de energía específica próctor normal y modificado (600 y 2100 kN m⁻², respectivamente; UNE-EN 103500-1994, UNE-EN103501-1994; ASTM-D698, ASTM-D1557).

$$E_e = \frac{N \cdot W \cdot h}{V} \quad \text{e.5.1.}$$

En la expresión e.5.1, E_e es la energía específica, W el peso de la masa que impacta sobre el terreno, h la altura de caída de dicha masa, N el número de golpes y V , el volumen de terreno afectado.

Al finalizar el proceso de compactación se tomaron, sobre la superficie de la capa, 25 muestras equiespaciadas para la determinación de la humedad, junto con otras 16 para determinación precisa de la densidad, extraídas del punto medio entre cada cuatro muestras de humedad. La posición de las muestras para humedad y densidad se representan de forma esquemática en la Figura 5.2.

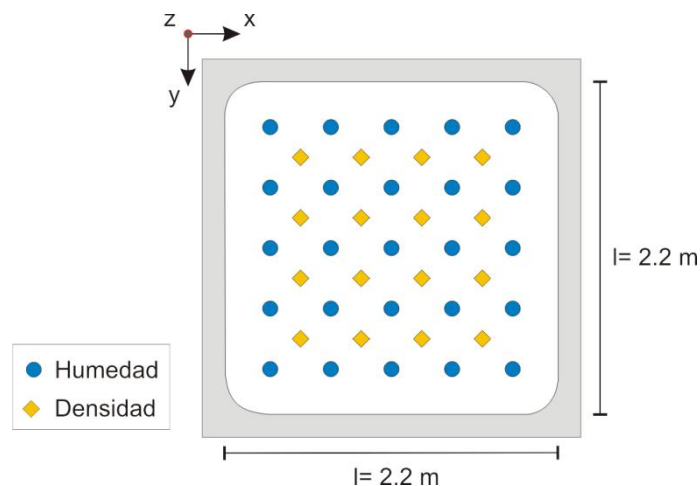


Figura 5.2. Posición de las muestras extraídas para la determinación de la humedad y la densidad, sobre la superficie de una capa compactada.

La determinación del contenido de agua del material se llevó a cabo por el procedimiento de secado en estufa (UNE-EN 103300-1993). Por su parte, la densidad fue evaluada empleando un método desarrollado en el contexto del presente estudio y que es presentado con detalle en el Anexo I.A.

De modo resumido, el método para determinación de la densidad desarrollado se basa en el uso de un escáner 3D con el que se determina el volumen de pequeñas unidades de suelo (con superficies de varios cm^2), cuya masa es, a su vez, determinada con balanza en laboratorio. De la combinación entre ambas magnitudes se obtiene la densidad de la muestra.

Las observaciones de humedad-densidad obtenidas dan lugar a dos matrices de datos, las cuales fueron interpoladas empleando una rutina programada en *MatLab* (*neocompact.mat*), a partir del cual se obtiene la representación gráfica de la distribución de ambos parámetros en la capa. Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos para el análisis de la eficacia compactadora (sólo vibración o vibración + impacto), se muestran en la Figura 5.3 (sólo vibración) y Figura 5.4 (vibración + impacto).

El análisis de los resultados muestra un valor medio mayor y una distribución más homogénea de la densidad seca de la capa ($\overline{\rho_d}$), cuando la compactación se realiza con vibroapisonador, además de una dispersión menor en el contenido en agua promedio (\overline{w}). Estos valores medios son coherentes con la rama descendente de la curva próctor modificado de los serrines de granito (Barrientos *et al.*, 2010).

La compactación con bandeja vibrante muestra zonas periféricas más húmedas que las centrales, así como algunas anomalías respecto del valor de la densidad media. Estas anomalías podrían ser el resultado de heterogeneidades internas, reflejando puntos con mayor contenido en granalla.

Por su parte, el efecto de la mayor humedad en las zonas periféricas observado en el caso de la compactación por vibración, puede explicarse por el arrastre superficial de la herramienta sobre la capa durante el ejercicio. Suponiendo que el contenido en agua inicial de los serrines de granito fuese constante, la compactación por vibración habría inferido un proceso de migración de agua hacia zonas periféricas, menos accesibles.

Los resultados obtenidos son concluyentes y determinan que el mejor equipo para la compactación de los serrines de granito es el vibroapisonador. No obstante, hemos empleado también la bandeja vibrante para compactar el lecho de arena que constituye la base de la barrera estudiada. Su mayor superficie de contacto ha sido muy útil en la compactación de este material (poco cohesivo y con bajo contenido en agua), además de proporcionar un buen acabado superficial, con cierta pendiente, sobre el que fueron emplazados los serrines.

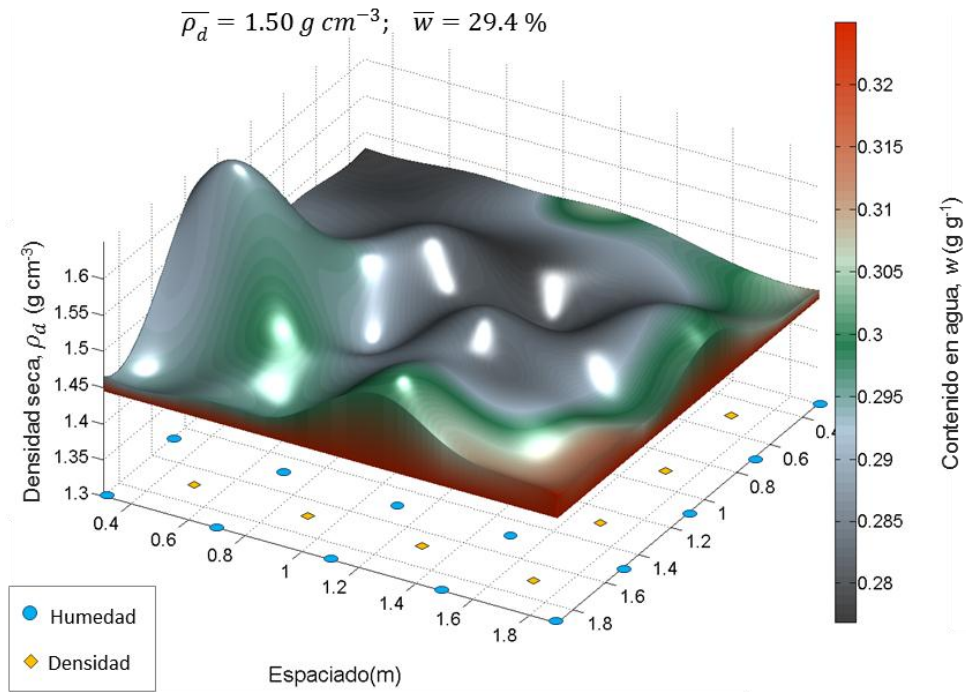


Figura 5.3. Representación de la distribución de la humedad-densidad seca de una capa de serrines de granito compactada con bandeja vibrante en el dispositivo experimental *ES-2345472-B1*. Proyección vertical de los puntos de muestreo iniciales (humedad y densidad). $\bar{\rho}_d$ y \bar{w} , valores promedio de densidad seca y contenido en agua, respectivamente.

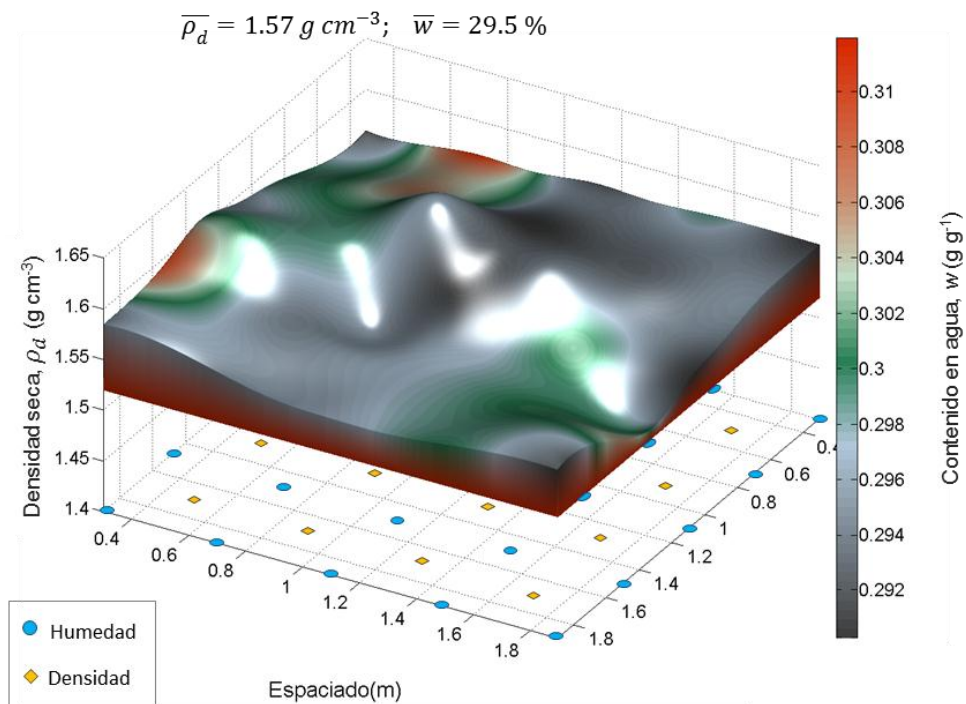


Figura 5.4. Representación de la distribución de la humedad-densidad seca de una capa de serrines de granito compactada con vibroapisonador en el dispositivo experimental *ES-2345472-B1*. Proyección vertical de los puntos de muestreo iniciales (humedad y densidad). $\bar{\rho}_d$ y \bar{w} , valores promedio de densidad seca y contenido en agua, respectivamente.

4.2 CONSTRUCCIÓN

La ejecución de los ensayos fue precedida por un proceso de construcción que comprendió el vertido, la instrumentación, la compactación y el muestreo de los materiales empleados: serrines de granito y arena. Aprovechando la disponibilidad de una carretilla de carga eléctrica ubicada en el laboratorio de trabajo (*CITEEC*), el material pudo ser vertido en el dispositivo experimental a razón de grandes cantidades (hasta 1 Tn).

De forma previa al llenado del dispositivo experimental, fue necesario instalar un sistema eficaz para la evacuación de lixiviados procedentes de la interfaz serrines/arena. Para ello, se adosó a la pared interior del recinto enfrentada a la máxima pendiente de la interfaz, una capa de drenaje vertical con un grosor aproximado de 5 cm, constituida por grava. La capa se materializa en el interior de un “sándwich” de geotextil *GEOTESAN NT-69 (COMPOSAN¹)*, anclado verticalmente a la pared de hormigón. Inferiormente, la capa vierte sobre una región lateral del recinto, especialmente preparada para recoger los lixiviados procedentes de la interfaz serrines/arena (elemento [12], Figura 5.1).

Es conveniente matizar que, si bien la base del dispositivo está preparada para separar los lixiviados laterales de los centrales, la banda lateral sobre la que se levanta la capa vertical de grava vierte hacia colectores específicos que permiten separar, a su vez, entre los lixiviados laterales por flujo preferente a través de los contornos y aquellos desviados por el efecto de barrera capilar a favor de la interfaz.

Tras instalar el drenaje vertical, se inició el proceso de vertido y compactación de los materiales. En primer lugar, sobre la base del recinto se vertió $\sim 1 \text{ m}^3$ de arena fina, cuyas propiedades se abordarán en profundidad en el siguiente apartado. En el seno de esta capa, se ubicaron un total de 8 psicrómetros. La capa fue arada y repartida homogéneamente, tras lo cual se llevó a cabo su compactación. Para ello se empleó la bandeja compactadora vibratoria descrita en el apartado anterior. Esta capa fue compactada durante 45 min, hasta alcanzar una pendiente final regular de unos 7° ($\sim 11\%$).

La capa de arena fue muestreada para determinar su humedad y densidad de puesta en obra (5 muestras). Mientras que la humedad fue determinada mediante el método del secado en estufa (UNE-EN 103300-1993), la densidad natural se evaluó mediante un método de sustitución, aproximativo (Tabla 5.1).

Los serrines fueron dispuestos inmediatamente encima de la capa de arena, en tres tongadas de diferente grosor. Cada uno de ellas fue compactada y muestreada de forma secuencial. En la interfaz de las capas de serrín se emplazaron 10 sondas de capacitancia (Figura 5.5). La primera de las capas fue vertida sobre la superficie de la capa de arena, adoptando su misma pendiente a muro. A techo, la capa recuperó levemente la horizontalidad, siendo con la segunda capa de serrín cuando se alcanzó una morfología superficial horizontal. La última capa

¹ Detalles técnicos: www.composan.es

presenta una potencia regular, a la vez que representa la superficie de material expuesta a la hidratación durante la ejecución de los ensayos.

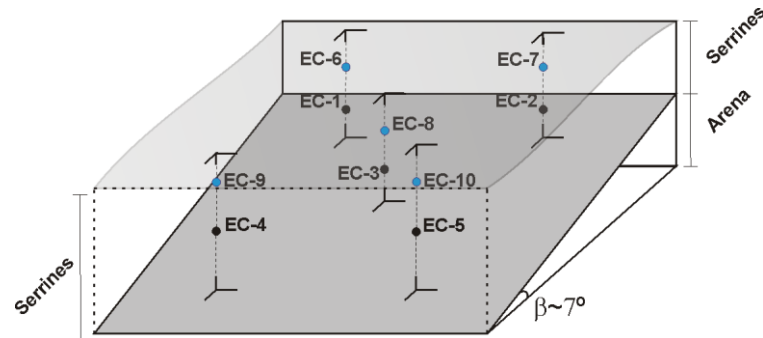


Figura 5.5. Posición de las sondas de humedad ECHO EC5 (EC-1 a EC-10), dentro de los serrines de granito en el ensayo de barrera capilar. β , ángulo de inclinación de la superficie interfaz entre serrines de granito y arena.

Las capas de serrín fueron compactadas con el vibroapisonador descrito en el apartado anterior, durante un periodo de tiempo comprendido entre 30 y 45 min. Tras finalizar la compactación de cada capa, se llevó a cabo el muestreo para determinación de su densidad y humedad, con las cuales se establecieron las condiciones iniciales de ensayo (Tabla 5.1). Para ello, se empleó la metodología descrita en la sección donde se abordó la selección del mejor método de compactación (apartado 4.1): 25 muestras equiespaciadas para humedad y 16 de para determinación de densidades, extraídas del punto medio entre cada cuatro muestras de humedad.

Tabla 5.1. Barrera capilar con serrines de granito y arena. Condiciones iniciales de ensayo.

Capa	C_{max} (m)	C_{min} (m)	P_{Techo}	ρ_d (g cm ⁻³)	$-\sigma_\rho$	θ (cm ³ cm ⁻³)	$-\sigma_\theta$	ϕ (cm ³ cm ⁻³)	S_w
Serrines	0	0	0%	1.525	0.019	0.401	0.010	0.529	0.758
Serrines	-0.05	-0.05	0%	1.581	0.027	0.343	0.015	0.503	0.682
Serrines	-0.07	-0.2	6.19%	1.551	0.013	0.371	0.007	0.512	0.725
Arena	-0.11	-0.35	11.43%	1.500	0.010	0.098	0.015	0.423	0.232

* C_{max} , cota máxima de la capa; C_{min} , cota mínima de la capa; P_{Techo} , pendiente superficial de la capa; ρ_d , densidad seca promedio; σ_ρ , desviación típica de ρ_d ; θ , contenido volumétrico en agua promedio; σ_θ , desviación típica de θ ; ϕ , porosidad media; S_w grado de saturación medio.

El final del muestreo y determinación de las condiciones iniciales de los distintos materiales, marcó el comienzo de la ejecución de los ensayos. El sistema de riego se situó sobre la zona superior del recinto experimental, quedando el modelo preparado para ser sometido a distintos procesos de simulación controlada de lluvias.

4.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

La roca de la que derivan tanto los serrines de granito como la arena empleada, es de tipo granítico. Las diferencias texturales entre ambos materiales es un factor de gran importancia en el rendimiento de la barrera capilar, estando condicionado su comportamiento hidrodinámico, entre otros aspectos, por las respectivas distribuciones granulométricas.

La curva granulométrica de los serrines de granito presentada por Barrientos (2007), permite identificarlos como un material limo-arcilloso de acuerdo con la clasificación textural de suelos USDA¹. El coeficiente de uniformidad medio es $C_u \sim 13$, mientras que el coeficiente de curvatura es $C_c \sim 1.1$.

Por su parte, la arena de trabajo no ha sido estudiada previamente, con lo cual fue necesario llevar a cabo un análisis granulométrico del material empleando para ello una bancada óptica *Coulter LS*. Los resultados muestran que se trata de una arena no uniforme con una proporción de finos <10%. Los coeficientes de uniformidad y curvatura son 7.8 y 1.9, respectivamente. Las curvas granulométricas de ambos materiales se comparan en la Figura 5.6.

Tomando como referencia el valor acumulado representativo del 90% de las partículas, se observa una diferencia superior a un orden de magnitud en el tamaño de grano entre ambos materiales. Esto induce a pensar que la arena seleccionada es adecuada para este tipo de dispositivos en base a los resultados de otros trabajos encontrados en la literatura sobre barreras capilares, en los cuales se demuestra que para diferencias del tamaño de grano superiores a un factor 5, la respuesta del drenaje lateral equivale a más del 90% (Jason y John, 2001).

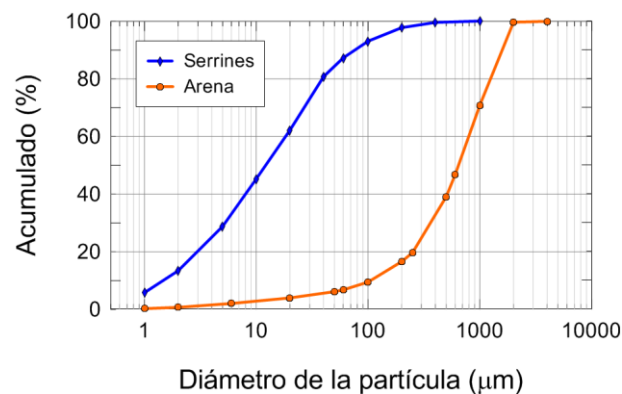


Figura 5.6. Curvas granulométricas de los materiales empleados en el dispositivo de barrera capilar.

La curva de retención y la conductividad hidráulica no saturada de los materiales que constituyen la barrera capilar, gobiernan el principio físico de funcionamiento. El conocimiento de la distribución granulométrica de la arena permite compararla con la de otros materiales similares, como medio de obtención de los parámetros hidráulicos necesarios para el ajuste de

¹ United States Department of Agriculture (www.usda.gov).

su curva de retención. Con este fin se realizó una revisión de las características de los materiales arenosos recogidos en la base de datos UNSODA¹ (USDA), compilada a partir de numerosas fuentes internacionales (Schaap y Leij, 2000). UNSODA almacena información de casi un millar de muestras de suelo de los distintos grupos texturales, contando con una gran variedad de datos: distribuciones del tamaño de partículas; densidad natural; capacidad retención de agua; conductividad hidráulica medidas en campo y en laboratorio (saturada y no saturada); descripción de los materiales y localización.

El primer paso de la revisión consistió en seleccionar los tipos de arena con mayor similitud en la distribución del tamaño de grano con respecto a la arena de trabajo. Para ello se compararon gráficamente las curvas de todos los materiales arenosos presentes en UNSODA con la curva de la arena representada en la Figura 5.6. De las 15 muestras seleccionadas, únicamente 6 recogían las características deseadas: origen silíceo, disponibilidad de datos de humedad-succión y valores de conductividad hidráulica saturada. Las distribuciones granulométricas de estos seis materiales se representan conjuntamente a la de la arena de trabajo en la Figura 5.7.

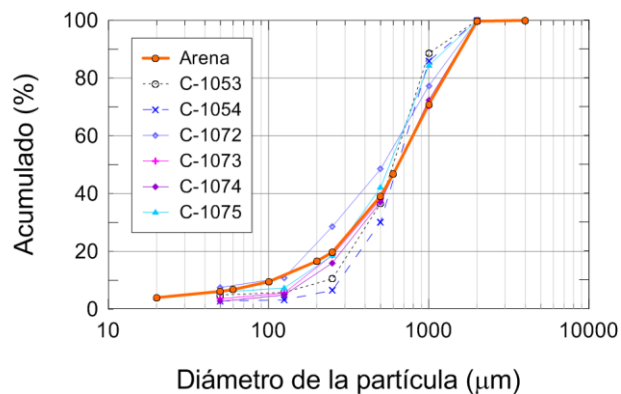


Figura 5.7. Curvas granulométricas obtenidas de UNSODA. Las siglas C-1053...1075, indican el código que adopta cada uno de los materiales en la base de datos.

En segundo lugar, se evaluaron los parámetros de la curva de retención para cada uno de los materiales seleccionados, empleando el código RETC² (Van Genuchten *et al.*, 1991). El programa permite un ajuste analítico simultáneo de los datos observados de retención de agua y conductividad hidráulica, incluyendo una forma flexible para introducir los datos y llevar a cabo procesos de optimización y evaluación de los parámetros de ajuste del modelo.

Los resultados obtenidos permitieron estimar de forma teórica los parámetros de la arena de trabajo como valor promedio de los ajustes llevados a cabo en los seis suelos evaluados. En la Tabla 5.2 se recogen los parámetros individuales ajustados para cada uno de los suelos UNSODA, además del valor estimado para nuestra arena. Los parámetros de ajuste de los serrines de granito son los propuestos por Barrientos *et al.* (2010), mientras que el contenido

¹ Unsaturated Soil Hydraulic Property Database (<http://www.ars.usda.gov/services/>)

² RETC: RETention Curve. (<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=15992>)

de agua en saturación adoptado es el valor promedio global obtenido en los serrines de la barrera, tal y como quedan recogidos en la Tabla 5.1. Por su parte, la conductividad hidráulica propuesta es la presentada por Barrientos (2007) como el valor más desfavorable en términos de impermeabilización.

Tabla 5.2. Parámetros de la curva de retención ajustados para seis suelos UNSODA con el código RETC, los adoptados para la arena de trabajo y los correspondientes a los serrines de granito.

Parámetro	Unidades	C-1053	C-1054	C-1072	C-1073	C-1074	C-1075	*Arena	- σ -	Serrines
θ_r	(cm ³ cm ⁻³)	0.038	0.029	0.051	0.032	0.024	0.050	0.037	0.01	0.090
θ_s	(cm ³ cm ⁻³)	0.341	0.348	0.318	0.311	0.352	0.352	0.337	0.02	0.515
α	(kPa ⁻¹)	0.698	0.729	0.609	0.651	0.899	0.836	0.737	0.09	0.193
n		3.574	4.220	2.717	2.973	2.586	2.591	3.110	0.56	1.410
m		0.720	0.763	0.632	0.664	0.613	0.614	0.668	0.05	0.291
K_s	(m s ⁻¹)	3.2·10 ⁻⁴	4.8·10 ⁻⁴	1.6·10 ⁻⁴	2.4·10 ⁻⁴	4.3·10 ⁻⁴	3.3·10 ⁻⁴	3.3·10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	6·10 ⁻⁷

* Arena: arena de trabajo, valor promediado a partir de arenas UNSODA (C-1053, C-1054, C-1072, C-1073, C-1074 y C-1075); σ desviación típica del valor adoptado para la arena de trabajo.

θ_r y θ_s , valores de contenido volumétrico en agua residual y saturado, respectivamente; α , n y m , parámetros de ajuste para la curva de retención; K_s , conductividad hidráulica saturada.

4.4 EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS SOBRE LA BARRERA CAPILAR

La barrera capilar fue sometida a dos procesos de riego controlado consecutivos, los cuales difieren entre sí en la cantidad de agua vertida y en el protocolo de ensayo. En el primero de ellos se simularon condiciones pluviométricas equivalentes a las del otoño del año 2000, tal y como fueron registradas en una estación meteorológica cercana a las fábricas de elaboración de los serrines empleados. En el segundo, se aplicó al modelo un total de seis ciclos de hidratación-secado consistentes en vertidos de una cantidad fija de agua sobre la barrera, alternando con periodos de secado natural (por evaporación desde la superficie) e inducidos (mediante ventilación forzada a través de los conductos de desagüe).

En ambos casos, los datos puntuales del registro de humedad de los serrines de granito, fueron corregidos a partir de la calibración de las sondas de capacitancia, tal y como se describe en el Anexo I.C.

4.4.1 SIMULACIÓN DE UNA SECUENCIA PLUVIOMÉTRICA REALISTA

La construcción del modelo de barrera capilar con serrines de granito dio paso a la ejecución de un primer ensayo de simulación de lluvia sobre el modelo. La selección de una serie pluviométrica real se llevó a cabo de acuerdo con una serie de consideraciones: el caudal mínimo y máximo reproducibles por el sistema de riego; la meteorología local de la zona

definida como de referencia (sur de la provincia de Pontevedra); periodo de lluvias de alta intensidad como representación de un caso extremo.

El sistema de riego está constituido por 12 tubos con 5 boquillas cada uno. Estas se encuentran repartidas de forma equidistante respecto de la superficie de la barrera. Cada boquilla permite suministrar un caudal máximo de $1.5 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$, lo cual limita el caudal del sistema de riego a $90 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$. Por su parte, el valor de caudal mínimo reproducible viene impuesto por el límite inferior de detección del modelo de caudalímetro empleado ($8.5 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$). En consideración a estas limitaciones, las series pluviométricas son previamente tratadas para suavizar extremos.

Para el estudio se seleccionó la estación meteorológica de Peinador (Vigo, Pontevedra). La localización de esta estación es la más cercana a la comarca de O Porriño (Pontevedra), lugar donde se encuentran la mayor concentración de industrias elaboradoras de piedra y, por tanto, escenario idóneo para el desarrollo de su aplicación práctica.

Los datos de lluvia, suministrados por el INM¹, abarcan las series pluviométricas anuales desde 1972 hasta 2002. Tras un primer análisis de los datos, se escogió el año 2000 como el más lluvioso de la serie considerada y, dentro de él, la estación otoñal (Figura 5.8). El criterio de selección se basó en que este periodo mostraba los datos de intensidad máxima más elevados (escenario pésimo).

El autómatas acoplado al sistema de riego fue programado para aportar caudales definidos por la intensidad máxima de precipitación. Para ello, se dividió cada día de lluvia en tantos ciclos secuenciales de precipitación, con caudal igual a la intensidad máxima, como fuese necesario para completar la precipitación total del día considerado.

De forma general, la serie adoptada permitió simular la precipitación real, con ligeras modificaciones por minimización de extremos. Sin embargo, cuestiones técnicas imprevistas relacionadas con el suministro eléctrico del laboratorio, provocaron interrupciones en la secuencia programada, requiriéndose la reprogramación en ciertos momentos del ensayo.

Como consecuencia, la aportación de agua realizada, así como su cantidad en el tiempo, quedó ligeramente desacoplada del planteamiento inicial. En particular, la anomalía técnica más importante provocó una parada en la hidratación de, aproximadamente, 10 días (25 de octubre - 4 de noviembre, de la secuencia simulada).

En la Figura 5.8 se representan, de forma conjunta, los datos correspondientes al periodo real simulado (en términos de precipitación total diaria e intensidad máxima de precipitación), junto con los valores adoptados tras la minimización de extremos y la corrección de las anomalías técnicas registradas durante el transcurso del ensayo.

¹ Instituto Nacional de Meteorología.

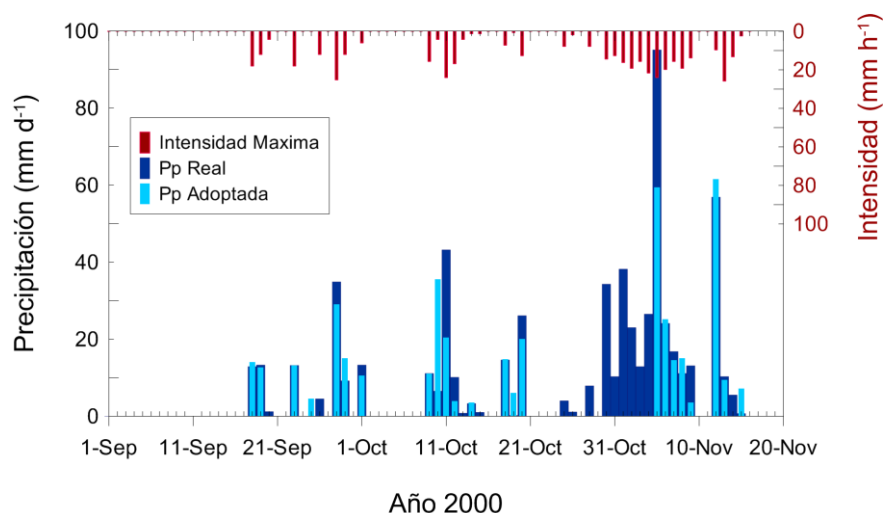


Figura 5.8. Datos pluviométricos empleados durante la simulación de la secuencia de lluvia artificial. Valores de precipitación diaria (*Pp Real*) e intensidad máxima por hora (*Intensidad Máxima*), durante el otoño del año 2000 (INM). Datos registrados en la estación meteorológica de Peinador, Vigo; *Pp Adoptada*, secuencia final simulada.

4.4.2 SIMULACIÓN DE CICLOS DE HUMECTACIÓN-SECADO

Al finalizar el ensayo con simulación de la secuencia pluviométrica real, el autómatas fue programado con una nueva configuración en la que se aportaron 30 dm³ distribuidos en periodos de 25 min. La hidratación se repitió de la misma forma en 6 ocasiones a lo largo de 3 meses consecutivos (aportaciones quincenales).

Los periodos entre aportes incluyen dos etapas semanales, durante las cuales se llevó a cabo la medida del caudal lixiviado (primera semana) y un proceso de ventilación forzada desde la base del dispositivo (segunda semana).

La medida del caudal de lixiviación se realizó a partir del incremento de masa observado en el depósito de lixiviados, el cual quedaba determinado mediante pesada con una báscula comercial en laboratorio, teniendo en cuenta las pérdidas por evaporación.

Se constató que, transcurrida una semana desde el riego superficial, la cantidad de agua lixiviada era aproximadamente nula, momento en el cual se procedía a la aireación forzada desde la base del modelo. Ésta se realizó aprovechando los colectores para lixiviados centrales, los cuales fueron acoplados a tres ventiladores domésticos con los cuales se impulsó hacia el interior del modelo un cierto caudal de aire (no cuantificado), durante una semana. De forma paralela, durante las dos semanas la superficie del modelo queda expuesta a la evaporación natural.

Con el fin de cada etapa de aireación se inició una nueva fase de aportación de agua. Como hemos comentado, esta secuencia de aportación-lixiviación-aireación se repitió hasta en seis ocasiones. Este estudio, en su concepción, es un tanto singular y se considera una primera aproximación al estudio del envejecimiento acelerado de los serrines de granito.

5 RESULTADOS

Los ensayos con la barrera capilar han empleado un volumen de agua cercano a 1.9 m^3 . Teniendo en cuenta el volumen de serrines ($\sim 1 \text{ m}^3$) y arena ($\sim 0.75 \text{ m}^3$), la porosidad media de ambos materiales y sus respectivos contenidos volumétricos en agua, la cantidad de agua que ha circulado por la barrera capilar equivale a casi 5 veces el volumen de poro libre total. No obstante, entre los resultados más significativos obtenidos se encuentra la ausencia de lixiviados de origen central en los dos experimentos llevados a cabo, lo cual sugiere un buen comportamiento de la barrera a la escala temporal de los ensayos desarrollados (~ 6 meses). Esto indicaría que la circulación de agua se ha limitado a la capa de serrines.

Los datos obtenidos a partir de las sondas de capacitancia emplazadas en el seno de los serrines aportan información valiosa del comportamiento del sistema. Sin embargo, los registros de los psicrómetros ubicados en la arena, carecen de sentido. Estos han presentado una alta dispersión en los valores, muy frecuentemente fuera del rango de medida certificado por el fabricante, lo cual puede obedecer a dos circunstancias: i) la succión de la arena se encuentra fuera del rango de medida del sensor; ii) los sensores quedaron dañados tras la compactación de la capa de arena. El desmantelamiento del ensayo sugiere que, a tenor de las anomalías físicas observadas en algunos de los sensores, los psicrómetros se han visto negativamente afectados por los procesos de compactación. Además, según los parámetros hidráulicos determinados para la arena (Tabla 5.2), la succión asociada a la humedad media final determinada en esta capa ($\sim 7\%$) se encontraría dentro del rango de medida del sensor.

5.1 EXPERIMENTO DE HIDRATACIÓN CON UNA SECUENCIA DE PRECIPITACIÓN REALISTA

Como hemos comentado con anterioridad, el primero de los ensayos sobre la barrera capilar consistió en la simulación de una secuencia pluviométrica realista, adaptada a partir de una real (periodo octubre-diciembre de 2000 de la estación de Peinador, Pontevedra). En la Figura 5.9 se representa el balance hídrico de esta primera fase del experimento.

En el ensayo se vertió sobre la barrera un volumen total de 1.66 m^3 de agua (agua de abastecimiento). Entre los datos más significativos está la ausencia de lixiviados centrales en el modelo. Se ha observado que la totalidad de los lixiviados drenan de la barrera a través de los colectores laterales, en particular, aquellos diseñados para recoger el agua de la interfaz serrines/arena.

Tras la finalización de esta etapa del ensayo, el balance global es positivo, con un exceso de $\sim 50 \text{ dm}^3$ atribuible a un incremento de la cantidad de agua almacenada por el material de la barrera. Al no producirse lixiviados centrales y no detectarse señal en los psicrómetros, se puede interpretar que el agua vertida no alcanza la capa de arena. Teniendo en cuenta que el volumen total de serrines ubicados en la barrera es $\sim 1 \text{ m}^3$, si la arena no se ve afectada por un aumento de su contenido en agua, el exceso implica un incremento medio de aproximadamente un 2% en el contenido volumétrico de agua (θ) de los serrines.

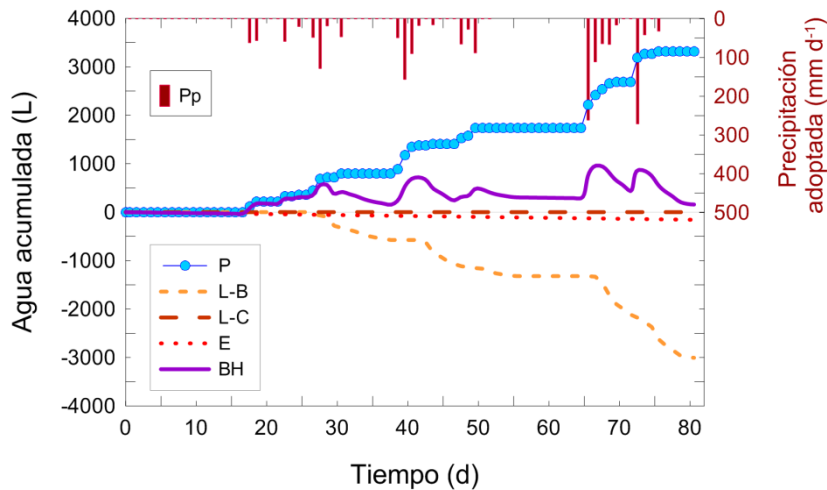


Figura 5.9. Balance hídrico del ensayo de simulación de la serie pluviométrica adoptada sobre la barrera capilar. Pp , precipitación adoptada en el ensayo; P , agua vertida; $L - B$, lixiviados desviados por el efecto de la barrera capilar; $L - C$, lixiviados centrales; E , evaporación; BH , balance hídrico.

Este incremento de humedad queda atestiguado por las lecturas de las sondas de capacitancia ubicadas en los serrines (Figura 5.10). La tendencia de la humedad es creciente en todos los casos salvo en EC-1 y EC-5, para los que se observa un comportamiento anómalo. En el caso particular del sensor EC-1, observamos una tendencia creciente en la humedad hasta los estadios finales del ensayo (medidas de noviembre), momento en el que se registra una caída brusca en la señal detectada. Su posición en la capa, es similar a la de EC-6 pero a cota inferior. Junto al sensor EC-2, son los dos más cercanos a la interfaz serrines/arena. Teniendo en cuenta la tendencia creciente y regular de EC-2 y EC-6, la caída en la señal de EC-1 es atribuible bien a una anomalía de carácter local o instrumental. El mismo comportamiento se observa en el registro del sensor EC-5, comparado con EC-4 y EC-10.

Las sondas de capacitancia muestran el comportamiento interno de las capas de serrines durante el ensayo. Las sondas más superficiales (EC-6 a EC-10) reflejan el efecto de los aportes de forma abrupta mientras que en las inferiores (EC-1 a EC-5), la respuesta es más progresiva. Los sensores situados más cerca de la superficie revelan picos más o menos acusados de θ , relacionados con el momento del vertido sobre la barrera, tras lo cual recuperan la condición previa del material. De forma aproximada, todos los sensores muestran una cierta homogeneidad en el rango de humedad del 37-40%, el cual representa la máxima capacidad de retención del material para las condiciones de ensayo (capacidad de campo). Por su parte, los sensores emplazados en zonas más profundas ilustran el progresivo incremento de humedad, aunque poco acusado ($\sim 1\%$), tras un periodo inicial sin aportes superficiales y en el que se produce un reajuste de la humedad entre las diferentes capas de serrines.

Los registros de los sensores muestran un ligero desfase de la señal registrada respecto a los instantes de vertido, el cual responde a la conductividad hidráulica del material a las condiciones de ensayo. El máximo caudal de lixiviado se correlaciona bien con las aportaciones mayores, aunque aparece varios días después de producirse el vertido correspondiente. Es

interesante como los sensores no reflejan tales picos debido a la incapacidad de retener el agua por parte de los serrines una vez que se ha superado su capacidad de campo.

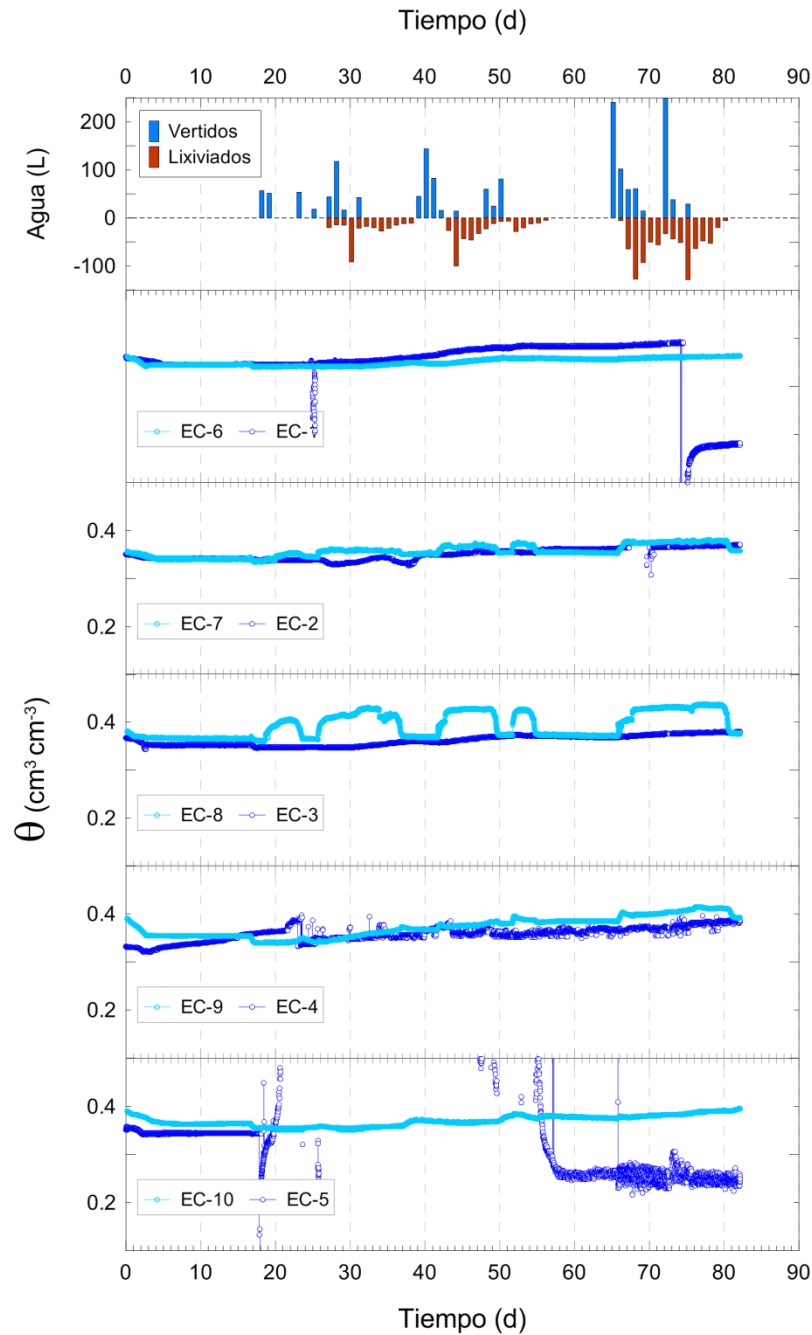


Figura 5.10. Simulación de la serie pluviométrica de otoño del año 2000, estación de Peinador (Vigo). Representación conjunta del agua vertida, lixiviados y registros de las sondas ECHO EC5 ubicadas en la capa de serrines de granito, en términos de contenido volumétrico en agua (θ).

El efecto de la infiltración en los sensores más superficiales se refleja en un incremento temporal de la humedad, el cual es coherente con el periodo de tiempo durante el que la barrera permanece inundada en superficie (caso de EC-8, EC-7 y, de forma menos clara, EC-9). Los sensores más profundos, por su parte, no reflejan estos picos de vertido sino un incremento progresivo del contenido de humedad. Este comportamiento se interpreta como el

resultado de un efecto tampón de la interfaz serrines/arena en la barrera. Así, el agua es almacenada en la capa de serrines, aun superando su capacidad de campo, produciéndose la desviación lateral del flujo a favor de la pendiente, en lugar de avanzar verticalmente hacia la capa inferior con propiedades hidráulicas diferentes.

5.2 EXPERIMENTO CON CICLOS HIDRATACIÓN-AIREACIÓN

La segunda fase del experimento consistió, como hemos explicado, en la imposición de seis ciclos de hidratación-secado controlados, de acuerdo con la siguiente secuencia: i) riego superficial, durante 30 min; ii) medida del caudal lixiviado, a lo largo de una semana tras el aporte de agua; iii) secado natural (evaporación superficial) desde el final del aporte, y forzado (ventilación a través de los tubos colectores de la base del modelo), durante 7 días a contar desde el fin de la salida de lixiviados.

En el momento de iniciar esta fase, la barrera presenta unas condiciones de humedad inicial distintas a las del momento en que se construyó. Esta diferencia obedece al incremento de humedad en los serrines por el agua vertida durante la fase previa de ensayo. No obstante, en esta segunda fase se contrasta que los lixiviados centrales son inexistentes y que la salida de agua sólo se produce a través de los drenes de desviación lateral, especialmente diseñados para recolectar el flujo afectado por el efecto de la barrera capilar.

El avance del frente de infiltración a través de los serrines ha sido registrado de forma puntual con las sondas de capacitancia. Los registros muestran, nuevamente, respuestas casi instantáneas de los sensores superficiales y una variación gradual en el contenido de humedad en los sensores más profundos (Figura 5.11). Los sensores EC-8, EC-7 y EC-9, reflejan la llegada del frente de hidratación de forma clara en todos los ciclos. El incremento de humedad se mantiene durante varios días, tras lo cual recupera la humedad inicial en la capa. Este comportamiento identifica el valor de la humedad correspondiente a la capacidad de almacenamiento máxima de los serrines, a las condiciones de ensayo [37-40%].

Por su parte, los sensores ubicados en zonas más profundas muestran la llegada del frente de saturación de forma mucho más atenuada, tal y como se ilustra en las ampliaciones de la Figura 5.11. En estos sensores se observa un incremento de la humedad a lo largo de esta fase del ensayo, para la mayoría de los casos. Este progresivo incremento puede interpretarse, igual que en la fase anterior de ensayo, como el efecto tampón de la barrera en la interfaz serrines/arena.

Los sensores EC-1 y EC-5 muestran comportamientos anómalos, con humedades más bajas de las que reflejan sus homólogas EC-6 y EC-10, respectivamente. En el caso de EC-5, se observa una alta dispersión en los registros. El sensor EC-4 también refleja cierta dispersión, con tendencia creciente a lo largo de los dos ensayos hasta estabilizarse en $\theta \sim 0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (nótese la progresión del sensor de la Figura 5.10 a la Figura 5.11). Este tipo de comportamientos anómalos pueden estar determinados por pérdidas del contacto sensor/suelo, así como por el mal funcionamiento de la sonda implicada.

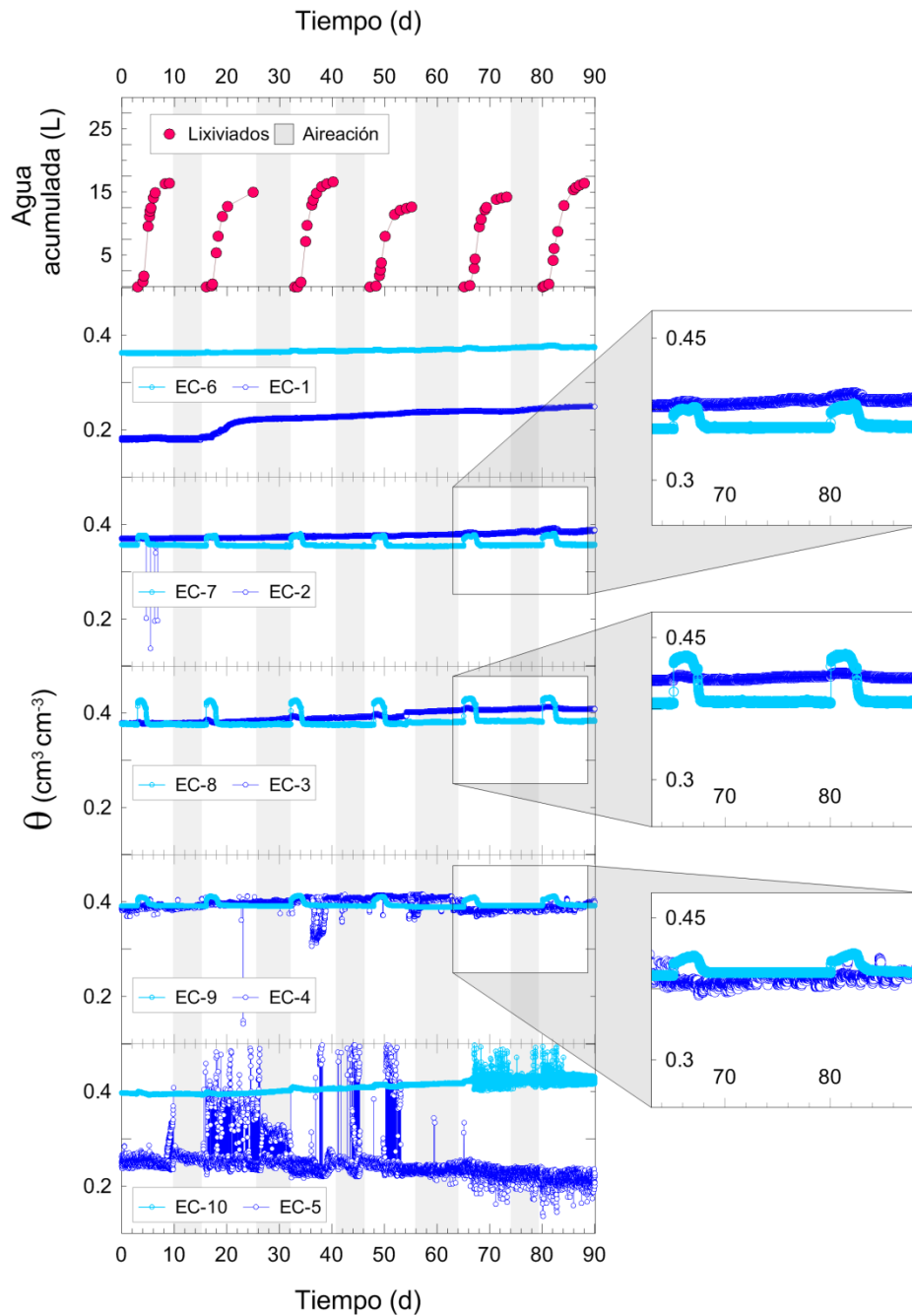


Figura 5.11. Ciclos de hidratación-aireación. Representación conjunta de los lixiviados acumulados, los periodos de aireación y el registro de las sondas de capacitancia ubicadas en la capa de serrines de granito, en términos de contenido volumétrico en agua (θ).

La ventilación forzada desde la base del dispositivo experimental no obtiene reflejo en el registro de los sensores. Conjeturamos que la eficacia del sistema de ventilación fue insuficiente para inducir una desaturación medible, ya que el aire, para alcanzar los sensores de humedad más profundos, debería atravesar el espesor de la capa de arena y el de la primera capa de serrines.

No obstante, hay que puntualizar que la finalidad de los procesos de aireación es forzar la oxigenación en la interfaz serrines/arena, con el fin de acelerar los procesos de cementación

(observados en ensayos previos; Capítulos 3 y 4) producto de la oxidación de fases primarias o la precipitación de minerales por reacción de los lixiviados procedentes de las capas superiores de serrín. Su objetivo era, por tanto, promover la formación de costras de oxidación (hardpans).

El análisis de este tipo de modificaciones, con repercusión en las propiedades de la barrera se lleva a cabo, en primer lugar, de forma indirecta a partir de los datos de caudal lixiviado. Los ciclos de hidratación-aireación simulados comienzan con un vertido, seguido de la cuantificación de lixiviados asociados al mismo y, finalmente, la aireación forzada desde la zona inferior. El desarrollo de esta circunstancia podría afectar a las propiedades hidrodinámicas de la barrera. Para comprobar este extremo, hemos representado las curvas de caudal lixiviado en función del tiempo (Figura 5.12). En ella, podemos constatar que existe un desfase del máximo registrado durante el primer ciclo respecto al resto. La diferencia entre este primer ciclo y los siguientes estriba en que en el primero no estuvo precedido de ventilación forzada.

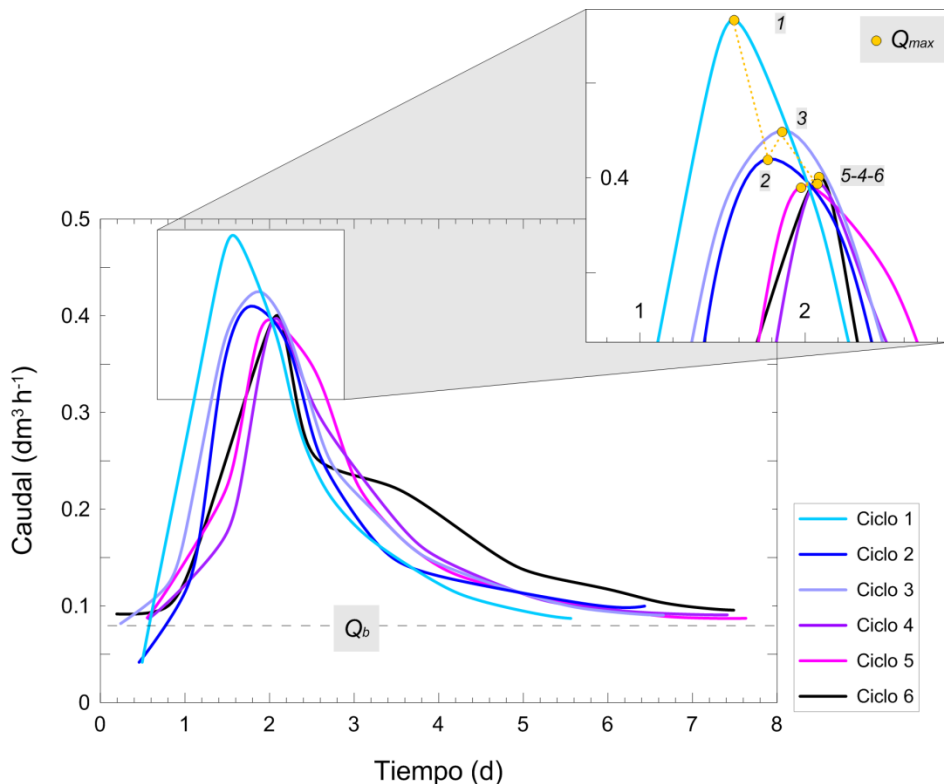


Figura 5.12. Ciclos de hidratación-aireación. Balance de los caudales recolectados tras cada uno de los episodios de vertido. Curvas ajustadas mediante spline cúbico de los datos originales. Q_{max} y Q_b , caudal máximo y caudal base, respectivamente.

Las curvas de caudal dibujan una curva análoga a la de un hidrograma: una llegada de caudal inicial que crece con el tiempo hasta alcanzar un caudal máximo, para posteriormente decrecer de forma progresiva hacia un caudal estable (caudal base). Los hidrogramas son útiles, entre otras cosas, para conocer la capacidad de respuesta de un sistema ante avenidas (p.ej. un canal o una cuenca hidrográfica). Del mismo modo, nuestro hidrograma muestra un

interesante comportamiento diferencial en función del ciclo considerado. El primer ciclo presenta el máximo absoluto de la serie, dibujando una curva de fuertes pendientes interpretable como un comportamiento rápido de evacuación de excedentes por parte del dispositivo de barrera. Los ciclos 2 y 3 muestran máximos levemente superiores al resto, además de alcanzar este estadio de forma más temprana. El resto de ciclos presentan máximos similares, con leves diferencias temporales entre sí.

El análisis de los diferentes máximos muestra una tendencia de ralentización en el tiempo durante los tres primeros ciclos, la cual no es extrapolable al resto. Los tres últimos ciclos presentan morfologías y máximos similares en las curvas de caudal lixiviado, interpretable como una creciente estabilización del comportamiento del dispositivo de barrera bajo las condiciones simuladas.

Tal y como hemos puesto en evidencia en los ensayos ilustrados en los capítulos anteriores, las costras de oxidación (hardpans) tienden a generarse preferentemente en las zonas de contacto serrín/aire. En el caso del experimento estudiado en este capítulo, estas zonas se limitan a la zona superficial de la barrera expuesta a las condiciones ambientales y a la superficie de contacto serrín/arena, la cual fue sometida a una ventilación forzada desde la zona inferior del modelo. Este hecho ha sido confirmado a partir de las muestras procedentes de varios testigos extraídos en la barrera, tras la finalización del ensayo. En la Figura 5.13 se ilustra una muestra de la interfaz serrín/arena, antes y después de haber sido secada (A y B, respectivamente). La observación de visu permite identificar la presencia de una costra de oxidación que retiene los granos de arena, con un espesor de varios milímetros.

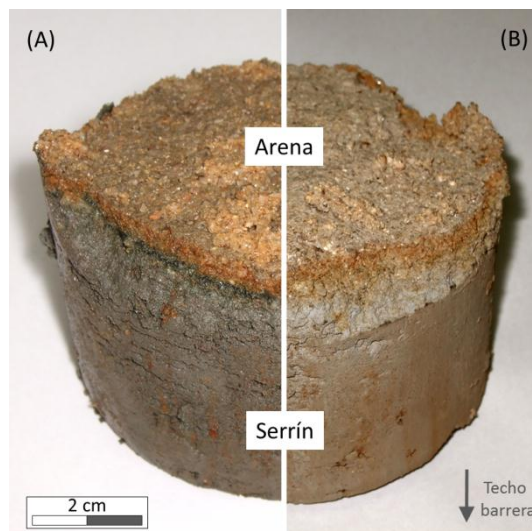


Figura 5.13. Muestra de un testigo extraído de la barrera capilar. (A) Muestra en estado natural; (B) Muestra tras deshidratación forzada en estufa (UNE-EN 103300-1993).

Por lo tanto, la evolución de las curvas de caudal puede obedecer a la combinación de dos factores: i) deshidratación parcial de la capa de serrines por evaporación, aumentando su capacidad de almacenamiento; ii) descenso de la permeabilidad de cómo consecuencia de la reducción del espacio poroso por cementación.

5.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el experimento con la barrera capilar muestran un rendimiento del 100% en cuanto al drenaje lateral, sobre un vertido total cercano a 1.9 m^3 . La eficacia de este tipo de configuración en capas ha de ser evaluada atendiendo a diversos factores: i) distribución granulométrica de los materiales involucrados; ii) la pendiente de la interfaz; iii) la capacidad de almacenamiento de la capa de finos; iv) la potencia de las capas y sus humedades iniciales; v) la intensidad de la lluvia sobre la superficie; vi) la efectividad del sistema de drenaje lateral.

En tanto que aspectos como la pendiente de la interfaz, potencia de las capas, riegos y drenaje, quedaron prescritos durante la construcción y ejecución de los ensayos, es relevante profundizar en la hidrodinámica de los materiales implicados para comprender mejor el comportamiento global del sistema. Este análisis lo hemos llevado a cabo a través del conocimiento de las propiedades físicas de los materiales (Tabla 5.1) y los registros de los sensores de humedad.

La distribución granulométrica de la arena permitió ajustar, a partir de otros materiales de propiedades similares (UNSODA), los parámetros necesarios para calcular su curva de retención. Conocidos sus homólogos en los serrines de granito, es posible analizar el régimen de drenaje lateral que ha gobernado en el dispositivo de barrera desde un punto de vista teórico (ver parámetros en Tabla 5.2).

En la Figura 5.14 se representan las curvas de succión-humedad y succión-conductividad hidráulica obtenidas mediante las funciones de Van Genuchten (1980) y Mualem (1976), respectivamente. Estas funciones, descritas en capítulos previos (ecuaciones e.3.18 y e.4.4), se resolvieron a partir de las condiciones iniciales de ensayo y los parámetros de ajuste recogidos en la Tabla 5.2, empleando la aproximación de suponer $K_0 = K_s$ y $L = 0.5$ en la ecuación de Mualem.

La condición inicial del ensayo queda identificada mediante los puntos con notación S1 y A1, los cuales reflejan el estado inicial humedad-succión-conductividad de los serrines de granito y la arena, respectivamente. En términos absolutos, la succión en la capa de serrines es superior a la de la arena, lo cual induce un reequilibrio inicial de presiones, por pérdida de humedad en la arena desde A1 a A1b. Bajo estas condiciones, la conductividad hidráulica de los serrines de granito es superior a la de la arena.

Durante la ejecución de los ensayos (~6 meses) los serrines fueron hidratados por riego superficial, lo cual provocó un aumento de su contenido de humedad (desde S1 hasta S2), al margen de la pérdida de excedentes por drenaje lateral. La humedad final alcanzada es, aproximadamente, la correspondiente a los valores registrados por las sondas de capacitancia, lo cual es, a su vez, coherente con los excesos del balance hídrico. Esta condición presenta valores θ_f , ψ_f y k_f , en cuanto a humedad, succión y conductividad hidráulica, respectivamente.

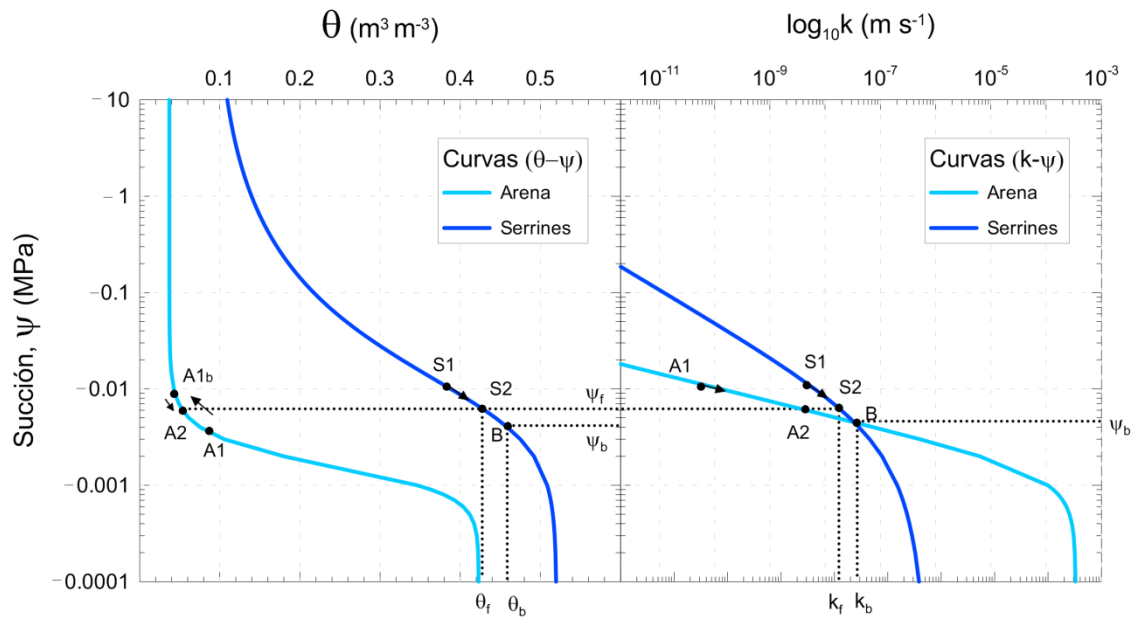


Figura 5.14. Representación de curvas succión-humedad ($\theta - \psi$) y succión-conductividad hidráulica ($k - \psi$). A1 y A2, puntos inicio y final de ensayo en las curvas de la arena; A1b, punto de equilibrio inicial de las condiciones de la arena con la de los serrines; S1 y S2, puntos inicial y final de ensayo en las curvas de serrines de granito; B punto de pérdida de estabilidad de las condiciones de la barrera; θ_f , ψ_f y k_f , contenido volumétrico en agua, succión y conductividad hidráulica de los serrines al final del ensayo, respectivamente; θ_b , ψ_b y k_b , ídem para las condiciones de pérdida de estabilidad (drenaje vertical).

Tras la finalización del ensayo, puede observarse cómo el incremento en el contenido en agua de los serrines no ha sido suficiente como para alcanzar el punto B de pérdida de estabilidad del sistema. Este punto representa la condición de equilibrio de presiones entre ambos materiales (ψ_b), a partir de la cual la conductividad hidráulica de los serrines de granito comienza a ser menor que la de la arena (k_b), permitiendo el avance del flujo vertical. Para ello, el contenido volumétrico en agua de los serrines a las condiciones de ensayo, debería alcanzar un valor aproximado de $0.45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (θ_b).

El análisis teórico de la hidrodinámica del sistema es coherente con los datos experimentales registrados. Un dato relevante de la condición final del sistema es la humedad media determinada en la capa de arena, a partir de las muestras de testigos extraídos en la barrera, cuyo valor fue de $\sim 0.07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

El resto de parámetros condicionantes del comportamiento del dispositivo de barrera capilar, son de tipo estructural y climático. Las condiciones climáticas más favorables para el funcionamiento óptimo de barreras capilares son las de clima seco (Aubertin *et al.*, 2009; Abdel Rahman, 2011). En ese contexto, los finos son deshidratados superficialmente por efecto de la evaporación, aumentando su capacidad de almacenamiento ante nuevos episodios de hidratación. Esta capacidad de almacenamiento está condicionada a su vez, por el espesor de la capa de finos.

En el caso estudiado, se han simulado condiciones pluviométricas propias de una región húmeda, donde las precipitaciones son altas. Se ha tomado, incluso, el otoño del año más lluvioso del registro histórico, como representación del escenario más desfavorable. La potencia de la capa de finos varía entre 10 y 35 cm, según su posición sobre el plano de la interfaz con el substrato de arena, con pendiente $\sim 11\%$. Por su parte, el espesor de la capa de arena oscila entre 5 y 30 cm con respecto a la solera del recinto experimental.

Estudios recientes demuestran la relevancia del grosor de la capa inferior y la pendiente de la interfaz, en las barreras capilares. De acuerdo con Qian (2010), cuanto mayor es el grosor de la capa de arena, más secas las condiciones ambientales y óptima la pendiente ($>10\%$), más eficaz resulta la barrera capilar. Este autor basa sus conclusiones en la respuesta experimental ofrecida por dos tipos de arena, con propiedades hidráulicas más cercanas entre sí que las de los materiales estudiados en nuestro trabajo. Por tanto, aunque no se descarta un buen funcionamiento para pendientes más suaves y potencias menores, el diseño estudiado puede ser suficiente para asegurar un rendimiento adecuado de las barreras capilares conformadas por serrines de granito y arena.

Por último, es preciso indicar la importancia de la humedad inicial en la capa de finos. Tal y como apunta Khire (2000), uno de los problemas que puede ocasionar un mal funcionamiento en una barrera capilar es la contaminación de la capa drenante inferior con finos procedentes de la superior por incorporación durante la construcción. Ello podría provocar una alteración de las propiedades texturales e hidráulicas del material drenante. Los serrines de granito, muestreados en sus puntos de origen, presentan un contenido de agua medio del orden del 36%. Bajo estas condiciones, el material se comporta de forma cohesiva, por lo que el efecto de migración de finos hacia la capa inferior se puede considerar despreciable.

6 PRINCIPALES CONCLUSIONES DEL ENSAYO

En este capítulo hemos estudiado el funcionamiento de una barrera capilar construida con serrines de granito. Los resultados han sido alentadores. Los serrines, vertidos y compactados sobre una capa de arena fina, igualmente compactada, han propiciado un efecto de retención capilar del agua infiltrada desde zonas superficiales, permitiendo la desviación lateral del flujo a favor de la máxima pendiente de la interfaz serrines/arena, hasta alcanzar los puntos de desagüe previstos.

El ensayo se ha desarrollado sobre el dispositivo experimental *ES-2345472-B1*. Su robustez y tamaño, han permitido el empleo de maquinaria convencional de compactación durante la construcción del experimento (vibroapisonador; bandeja vibrante). Con ello se han podido alcanzar unas condiciones iniciales de ensayo similares a las de obra civil, pero bajo condiciones de laboratorio controladas.

De acuerdo con nuestras pruebas, el método de compactación más eficaz con serrines de granito es la vibración combinada con el impacto (vibroapisonador), ya que el estudio de la

distribución de humedad y densidad tras la compactación de capas experimentales con métodos alternativos (sólo vibración y vibración + impacto), reveló una mayor densidad media y homogeneidad del reparto de humedad con este método. Por su parte, la bandeja vibrante permitió el alisado en pendiente de la capa de arena, gracias a su mayor superficie de contacto con el suelo y adecuación para este tipo de material.

Los valores de densidad media en serrines de granito, obtenidos a partir de la compactación del material mediante vibroapisonador, se traducen en un índice de huecos ~ 1.06 . Bajo estas condiciones, de acuerdo con Barrientos (2007) los serrines presentarían un coeficiente de permeabilidad $\sim 4 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ según la fórmula de Kozeny-Carman, e inferiores a 10^{-9} m s^{-1} según los valores obtenidos por el mismo autor en ensayos edométricos.

Además de las características constructivas del ensayo, la reproducción de series históricas de lluvia mediante el sistema automático de dosificación de caudal acoplado a un sistema de riego por nebulización, ha permitido establecer condiciones de ensayo cuasi-reales en laboratorio.

De modo general, las dos fases del ensayo realizado con la barrera capilar han mostrado respuestas similares del material para las condiciones de riego impuestas: ausencia de lixiviados centrales. Los sistemas colectores acoplados al dispositivo experimental con los cuales se puede distinguir entre lixiviados de procedencia central, lateral y aquellos particulares para recoger el agua de infiltración con movimiento a favor de la máxima pendiente de la interfaz serrines/arena, han limitado su registro a esta última fuente. Por tanto, la configuración de barrera capilar adoptada muestra una eficacia del 100% de desviación lateral de flujo, al menos, para los tiempos de ensayo evaluados (~ 6 meses).

El estudio teórico llevado a cabo tras la finalización del experimento, demuestra cómo el incremento en el contenido en agua de los serrines no ha sido suficiente para desestabilizar el sistema. La condición de equilibrio de presiones entre ambos materiales, a partir de la cual la conductividad hidráulica de los serrines de granito comienza a ser menor que la de la arena, permitiendo el avance del flujo vertical, se sitúa en un contenido volumétrico en agua cercano a $0.45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, mientras que el valor máximo alcanzado es < 0.42 .

Con carácter local, la instrumentación empleada para determinar la evolución de las condiciones de humedad de las capas, se ha comportado de forma satisfactoria en relación con los serrines de granito. Sin embargo, los psicrómetros emplazados en la arena no han aportado datos útiles, ya que registran datos fuera del rango instrumental, lo cual interpretamos como anomalías físicas del sensor generadas durante la puesta en obra por los procesos de carga y compactación, o debidas a succiones locales inferiores al límite de detección del mismo.

Por su parte, las sondas de capacitancia localizadas en los serrines de granito han registrado el avance del frente de infiltración a través del material con respuestas específicas según la posición de ubicación de cada una de ellas en la capa. Los sensores más superficiales muestran

picos de humedad coherentes con los vertidos efectuados. Tras el vertido, transcurrido un cierto tiempo, los valores son restituidos una vez el agua discurre hacia zonas inferiores de la barrera. El valor estacionario en el registro de humedades se interpreta como la capacidad de campo de los serrines, comprendida ésta entre 37-40% de contenido volumétrico en agua, a las condiciones de ensayo. Por su parte, los sensores más profundos presentan un comportamiento diferente, mostrando incrementos progresivos del grado de humedad del material durante el transcurso de los ensayos. En este caso, asociamos el comportamiento al efecto tampón establecido por la interfaz serrines/arena, donde la diferencia en las propiedades hidráulicas de ambos materiales genera un efecto de retención por parte de los serrines. Asimismo, la conductividad hidráulica de los serrines, cercana a la saturación, permite el movimiento del agua infiltrada a favor de la pendiente marcada por la interfaz entre ambos materiales, en lugar de continuar su movimiento vertical natural hacia la capa inferior de arena.

La fase experimental de hidratación/secado, ha permitido reconocer el retraso en la llegada del caudal máximo de lixiviado. La señal registrada por algunas de las sondas de capacitancia más profundas, indica un incremento progresivo de la humedad del material, interpretable como un aumento de la cantidad de agua almacenada por la capa de serrines. La aireación inducida pretendía forzar la oxigenación de la zona de contacto serrines/arena, favoreciendo la formación de encostramientos (hardpans). Las observaciones visu en muestras extraídas de la barrera tras la finalización de los ensayos ha permitido identificar que, efectivamente, tal fenómeno tuvo lugar en la zona más superficial de la capa de arena. La formación de este tipo de estructuras es beneficiosa para la barrera en términos mecánicos (estabilización de las capas en pendiente por incremento de la rugosidad y cohesión) e hidráulicas (disminución de la conductividad hidráulica de la arena por cierre de poros). Como valor añadido, los oxi-hidróxidos de Fe y Mn constituyen buenos filtros de retención de metales en disolución.

Sin embargo, el efecto de la aireación inducida debe ser estudiado en profundidad en tanto que, un exceso de impermeabilización en la base de la capa de serrines podría resultar contraproducente para el buen funcionamiento de la barrera. La razón volumen almacenado respecto del volumen evacuado podría verse incrementado por una eventual disminución de la conductividad hidráulica de los serrines, lo cual favorecería el rebasamiento del punto de estabilidad del sistema serrines/arena, en términos de presión de poro. El resultado sería el mal funcionamiento del sistema por percolación vertical a través de la capa de arena, en lugar de por desvío lateral a favor de la interfaz.

De modo general, el experimento ha demostrado una serie de características mínimas que aseguren el funcionamiento eficaz de barreras capilares empleando serrines de granito como material fino superficial y arena como material grosero, incluso bajo condiciones ambientales de alta humedad.

CAPÍTULO

6

DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES

1 Valoración de Resultados	147
1.1 Recapitulación de los Resultados Experimentales	147
1.2 Marco Legal de la Eliminación de Residuos Mediante Depósito en Vertederos	149
1.3 Serrines como Barrera Mineral para Impermeabilización en Vertederos	150
2 Conclusiones	152
3 Otras Líneas de Investigación	156

1 VALORACIÓN DE RESULTADOS

Los diseños experimentales empleados han permitido desarrollar ensayos controlados a partir de los cuales se ha reunido una gran cantidad de información referente al comportamiento de los serrines de granito como barreras naturales de impermeabilización y/o sellado, para uso en vertederos o con otros fines.

Los resultados alcanzados, ampliamente discutidos en cada capítulo, incluyen tanto aspectos relacionados con el rendimiento de los diseños experimentales y de la instrumentación empleada, como de las propiedades exhibidas por el material, bajo las condiciones de ensayo.

De acuerdo con los objetivos planteados al principio de esta memoria, en esta sección abordamos la valoración global de los trabajos realizados. Para ello, recopilamos los resultados más significativos de los experimentos, examinándolos desde el contexto de la normativa española que regula los requisitos generales para la admisión de residuos a vertederos (RD 1481/2001).

1.1 RECAPITULACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los datos obtenidos durante el transcurso de la investigación han permitido evaluar distintas propiedades de los serrines de granito, así como su comportamiento bajo condiciones ambientales específicas. Dejando al margen los resultados referentes al análisis de la eficacia de la instrumentación y las técnicas de muestreo empleadas, haremos hincapié en los aspectos particulares exhibidos por los serrines desde la perspectiva hidrogeoquímica, hidrodinámica y mineralógica.

1.1.1 ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO

La caracterización de los lixiviados de serrines de granito ha mostrado que nunca superan los valores máximos permitidos para residuos inertes (caso de los serrines), tal y como queda recogido en la Directiva 1999/31/CEE (2003/33/CE). En el análisis de su agua intersticial, se han registrado las mayores concentraciones de elementos peligrosos pero, a excepción del Cr, nunca superan los valores límite de la Directiva, cuando se comparan con los ensayos normalizados de percolación.

Al igual que el Cr, muchos metales aparecen concentrados preferencialmente en el agua de poro respecto del agua de drenaje libre, lo cual denota que estos constituyentes tienden a permanecer retenidos en el material. Por tanto, los serrines se configuran como una posible barrera geoquímica para su inmovilización, al menos, con carácter temporal.

El análisis del agua intersticial de los serrines de granito ha permitido identificar el bromo, dentro del abanico de constituyentes mayoritarios. Su origen puede estar asociado a las inclusiones fluidas presentes en los minerales del granito original, liberadas durante los

procesos de elaboración de la roca (corte y pulido). Sea cual fuere su origen, su alta concentración convierte al bromo en un trazador natural de los lixiviados de serrines de granito.

1.1.2 ANÁLISIS HIDRODINÁMICO

Los aspectos hidrodinámicos evaluados se han enfocado hacia la determinación de propiedades hidráulicas como la conductividad hidráulica o la capacidad de campo en las condiciones de ensayo. También se ha analizado el efecto de retención capilar que se produce al combinar este material con otro de propiedades hidráulicas contrastadas (arena).

Nuestros resultados difieren de los obtenidos por Barrientos (2007) a partir de ensayos geotécnicos convencionales (p.ej. ensayos edométricos donde $K_s < 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$), quien sugiere un valor de conductividad hidráulica saturada de $\sim 6 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ como el más desfavorable para condiciones de compactación próctor normal (UNE-EN 103500-1994). Sin embargo, ese mismo autor presenta un valor de campo de $\sim 4 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, obtenido a partir de un ensayo Lefranc realizado en un vertedero de serrines no compactados. Este valor concuerda razonablemente bien con las estimaciones más favorables alcanzadas en los ensayos sobre columnas experimentales, desarrollados en este trabajo.

Esta diferencia pone en evidencia la importancia de establecer unas condiciones de compactación comparables a la hora de evaluar el comportamiento hidrodinámico de materiales no cohesivos. En el caso de los ensayos edométricos realizados con serrines, la pequeña escala del ensayo así como la óptima compactación que se puede llegar a alcanzar, hacen que esta aproximación sea válida en el laboratorio pero no extrapolable a una escala mayor, cuando los métodos de compactación (sea por vibración, impacto o combinación entre ambos) son menos eficaces.

Es bien conocido que la conductividad hidráulica decrece a medida que desciende la humedad del material (conductividad hidráulica no saturada). Hemos comprobado experimentalmente que, por encima del 40% de contenido volumétrico en agua, los serrines pierden su capacidad de retención y el agua drena por gravedad. Este valor representaría, por tanto, la capacidad de campo de los serrines. Para esa humedad, la conductividad hidráulica de los serrines de granito disminuye hasta valores de $\sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$.

La capacidad de campo y la relativamente alta conductividad hidráulica de los serrines de granito, fueron nuevamente evaluadas a partir de una aproximación distinta, teniendo en cuenta los fenómenos de retención capilar. Para ello, construimos una barrera capilar empleando los serrines como material fino, superpuestos a una capa de arena compactada inclinada superficialmente, quedando una interfaz entre ambos materiales con una pendiente regular del 11%. Los resultados mostraron que, el agua infiltrada a través de los serrines de granito ($\sim 1.9 \text{ m}^3$ a lo largo del ensayo) drenó lateralmente a favor de la interfaz serrines/arena. Por lo tanto, para la configuración planteada, la eficacia de la barrera capilar fue del 100%, en

términos de desviación lateral del flujo de infiltración, durante el tiempo de ejecución del ensayo (6 meses).

1.1.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y MINERALÓGICO

El análisis textural y mineralógico llevado a cabo sobre secciones pulidas fabricadas a partir de muestras tomadas de las columnas experimentales de serrines de granito, ha permitido identificar la formación de costras de oxidación (*hardpans*) en zonas donde el material se encuentra en contacto directo con la atmósfera. Estas mineralizaciones, producto de la oxidación de granalla presente en los serrines o por la precipitación de minerales como producto de reacciones químicas de la interacción agua/serrines, actúan como un cemento de los granos del material. Como consecuencia, se reduce la porosidad, lo cual se traduce en una disminución (pequeña en nuestros ensayos) de la permeabilidad del sistema.

Los encostramientos fueron también identificados en las gravas y arenas empleadas como capas drenantes en algunas columnas experimentales, por la acción de lixiviados procedentes de serrines de granito. Por tanto, la fábrica original de la grava se vio modificada, quedando reforzada por el cemento neoformado (textura grano-portante).

Como consecuencia, los encostramientos, en tanto que se ha observado que su expansividad se limita a las capas superficiales, ponen en evidencia mejoras en el comportamiento del sistema. A título de ejemplo, citaremos el incremento inducido en la resistencia y su capacidad como filtros para la retención selectiva de ciertos metales a través de sus características de sorción.

En esta línea, es interesante recordar los resultados de Vázquez *et al.* (2008) en los que se presentaban resultados relativos a la determinación del punto isoeléctrico de los serrines de granito. De acuerdo con estos autores, de forma aproximada, el punto isoeléctrico respecto del pH (esto es, el valor del pH para el que la carga eléctrica de la superficie de un material es nula), se sitúa en un valor próximo a 4, teniendo los serrines carga neta negativa para valores más altos y positiva para $\text{pH} < 4$. En las condiciones de ensayo desarrolladas, donde el pH en el agua intersticial de la columna es elevado (~ 11), las especies catiónicas deben quedar retenidas preferentemente. Ello explica el enriquecimiento catiónico observado en el análisis composicional del agua intersticial de los serrines.

1.2 MARCO LEGAL DE LA ELIMINACIÓN DE RESIDUOS MEDIANTE DEPÓSITO EN VERTEDEROS

El Real Decreto 1481/2001, que incorpora al derecho español la Directiva 1999/31/CE, recoge: *“En el marco de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, y demás normativa aplicable, particularmente la legislación sobre prevención y control integrados de la contaminación, el presente Real Decreto establece el régimen jurídico aplicable a las actividades de eliminación de residuos mediante su depósito en vertederos. Asimismo, delimita los criterios técnicos mínimos para su diseño, construcción, explotación, clausura y mantenimiento...”*

Se entiende por vertedero, una instalación de eliminación de residuos, mediante su depósito subterráneo o en superficie, por periodos de tiempo superior a un año cuando su destino final sea la eliminación o dos años cuando su destino final sea la valoración, en el caso de residuos distintos de los peligrosos, y por un periodo superior a seis meses cuando se trate de residuos peligrosos. Atendiendo a esta consideración, los vertederos se clasifican en: vertederos para residuos peligrosos, vertederos para residuos no peligrosos, vertederos para residuos inertes.

El Anexo I de este Real Decreto recoge los requisitos generales para todas las clases de vertederos, en donde se establece que: *“Todo vertedero deberá estar situado y diseñado de forma que cumpla las condiciones necesarias para impedir la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales y garantizar la recogida eficaz de los lixiviados... La protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales durante la fase activa o de explotación del vertedero se conseguirá mediante la combinación de una barrera geológica y de un revestimiento artificial estanco bajo la masa de residuos.”*

Las barreras geológicas son barreras naturales con capacidad de atenuación suficiente para impedir un riesgo de contaminación del suelo y aguas subterráneas, del entorno circundante. En el caso de los vertederos, las zonas de riesgo se encuentran situadas en la base y los lados del espacio de almacenamiento de los residuos.

Tal y como recoge el citado Real Decreto, en referencia a la protección del suelo y de las aguas del medio, los contornos del vertedero dispondrán de una capa mineral con unas condiciones de permeabilidad (k) y espesor (P) cuyo efecto combinado en materia de protección del suelo, aguas superficiales y subterráneas, sea por lo menos equivalente al derivado de los requisitos siguientes:

- a. Vertederos para residuos peligrosos: $k \leq 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$; $P \geq 5 \text{ m}$.
- b. Vertederos para residuos no peligrosos: $k \leq 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$; $P > 1 \text{ m}$.
- c. Vertederos para residuos inertes: $k \leq 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$; $P \geq 1 \text{ m}$.

Adicionalmente, cuando la barrera geológica no cumpla tales condiciones, podrá complementarse mediante una barrera geológica artificial, que consistirá en una capa de mineral con $P \geq 0.5 \text{ m}$.

1.3 SERRINES COMO BARRERA MINERAL PARA IMPERMEABILIZACIÓN EN VERTEDEROS

El Real Decreto 1481/2001 estipula que la protección del suelo y aguas, tanto superficiales como subterráneas, se conseguirá combinando una barrera geológica con un revestimiento artificial en la base del almacenamiento.

A tenor de los requisitos legales, los resultados referentes a la conductividad hidráulica de los serrines de granito (obtenidos de forma experimental durante el transcurso de la presente

investigación) sugieren que los serrines no cumplirían con los valores mínimos exigidos para constituir barreras minerales de impermeabilización en contornos de vertederos.

Sin embargo, el mismo decreto no impone que la barrera impermeable deba ser monolítica. Además, puntualiza que el efecto combinado de permeabilidad y potencia de la barrera sea equivalente a los valores límite presentados en el apartado anterior.

Tal equivalencia puede conseguirse mediante la combinación de capas minerales que produzcan un efecto de oposición al flujo de infiltración, objetivo perseguido con la propuesta de materiales de baja permeabilidad.

Un ejemplo de dispositivo de oposición al flujo son las barreras capilares. Nuestro trabajo pone en evidencia su viabilidad, incluso bajo condiciones ambientales de alta precipitación. De forma específica, el análisis de los registros instrumentales muestra que el dispositivo funciona adecuadamente, al menos, para el periodo de ensayo (6 meses). Durante ese tiempo, la barrera mantuvo una permeabilidad media equivalente inferior a 10^{-8} m s^{-1} , calculada a partir del espesor de la barrera y el tiempo durante el cual no se produjeron lixiviados centrales.

De acuerdo con los requisitos de permeabilidad y espesor de las barreras minerales enunciados en el Real Decreto, los serrines de granito combinados con arena, conformando una barrera capilar, serían aptos para impermeabilizar y/o sellar, al menos, vertederos de residuos inertes. La viabilidad de este tipo de dispositivos para aplicación en vertederos de residuos no peligrosos y vertederos de residuos peligrosos, debe ser evaluada en términos temporales con mayor rigor. Asimismo, debe tenerse en cuenta la gestión de los lixiviados, así como el estudio de las interacciones de los lixiviados reactivos con el material de barrera.

Las ventajas de emplear serrines de granito en lugar de otros materiales (sintéticos o naturales), son de naturaleza variada:

- ◆ Permite valorizar un residuo inerte, dándole un uso sostenible y contribuyendo positivamente en la cadena de valor de la roca ornamental. Es, por tanto, una aproximación sostenible y respetuosa con el medio ambiente.
- ◆ Por la concentración de las industrias elaboradoras, existe suficiente disponibilidad, reduciéndose los costes de aplicación si su uso se realiza en zonas geográficamente próximas a los puntos industriales.
- ◆ Como ya hemos comentado, los encostramientos observados y sus características eléctricas, les permite actuar como filtros para la retención de ciertos contaminantes (p.ej. metales).

La aplicación final de nuestros resultados requiere el desarrollo de un estudio piloto sobre el terreno, con el concurso de las administraciones responsables.

2 CONCLUSIONES

A continuación, presentamos las principales conclusiones de nuestro estudio.

1 Los valores de conductividad hidráulica determinados experimentalmente mediante ensayos controlados en laboratorio con serrines de granito bajo distintos grados de compactación y humedad, han mostrado resultados superiores a los máximos exigidos para barreras minerales empleadas como aislantes en los contornos de vertederos, de acuerdo con el Real Decreto 1481/2001. Por tanto, el empleo de serrines de granito como barrera mineral simple para impermeabilización y/o sellado de vertederos controlados, no es aconsejable. Este primer punto se apoya en las siguientes conclusiones particulares:

1.1 La compactación por vibración + impacto con vibroapisonador ofreció los resultados más favorables, en términos de densidad y homogenización (índice de poros ~ 1.1), empleando serrines de granito parcialmente saturados. De acuerdo con Barrientos (2007), bajo estas condiciones los serrines presentarían un coeficiente de permeabilidad $\sim 4 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ según la fórmula de Kozeny-Carman, caso más desfavorable en términos de impermeabilización. Este valor es superior a 10^{-7} m s^{-1} , límite máximo para barreras minerales en vertederos, tal y como queda recogido en el RD 1481/2001.

1.2 El empleo de técnicas de muestreo no intrusivas con resolución espacial 3D (método geoeléctrico), sugiere la formación de vías preferenciales de flujo en las fases iniciales de la hidratación (*gravity fingers*), en capas de serrines de granito con baja humedad inicial compactadas por impacto con una maza próctor modificado. Estas estructuras están condicionadas por la repartición heterogénea de la humedad del material o la compactación diferencial del mismo, tendiendo a su atenuación a medida que aumenta la humedad. No obstante, los resultados ofrecidos por los serrines de granito en términos de oposición al flujo mejoran en uniformidad y ralentización con la eficacia de la compactación, siendo también proporcional a la humedad inicial del material.

1.3 La capacidad de campo estimada para los serrines de granito indica que el material es capaz de retener agua hasta $\sim 70\%$ de su porosidad total. En términos generales, superado este valor, el agua drena libremente por gravedad. La conductividad hidráulica bajo estas condiciones de humedad es de $\sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$. A pesar de que este valor es inferior al máximo impuesto por el RD 1481/2001, sólo podría tenerse en cuenta para capas no confinadas que permitiesen el drenaje.

2 De acuerdo con la premisa de equivalencia recogida en el RD 1481/2001 sobre el efecto de la barrera mineral, en términos de permeabilidad y espesor de las capas, así como la ausencia de limitaciones legales para combinar diferentes materiales y/o disposición geométrica de los mismos, los serrines de granito combinados con arena conformando una barrera capilar resultan aptos para impermeabilizar y/o sellar, al menos, vertederos de residuos inertes. Los resultados particulares que corroboran esta afirmación son:

2.1 La barrera capilar estudiada ha demostrado ser una eficaz configuración de desviación lateral del flujo de infiltración superficial para las condiciones de ensayo simuladas: alta intensidad de precipitaciones con vertido total $\sim 1.9 \text{ m}^3$; duración aproximada de ensayo seis meses; potencia total de barrera $\sim 0.5 \text{ m}$; pendiente interfaz serrines/arena $\sim 11\%$. Esto se corresponde con una permeabilidad equivalente de la barrera capilar por debajo de 10^{-8} m s^{-1} , valor inferior al exigido para barreras minerales de impermeabilización en vertederos de residuos inertes.

2.2 El estudio teórico llevado a cabo a partir de los datos de inicio y fin de ensayo, refleja cómo el incremento en el contenido en agua de los serrines no ha sido suficiente para desestabilizar el sistema. La condición de equilibrio de presiones entre ambos materiales, a partir de la cual la conductividad hidráulica de los serrines de granito comienza a ser menor que la de la arena, permitiendo el avance del flujo vertical, se sitúa en un contenido volumétrico en agua cercano al 45%, mientras que el valor máximo alcanzado en la barrera es del 42%. Este dato sugiere que la barrera funcionaría con eficiencia durante periodos de tiempo prolongados a los ensayados (6 meses).

3 El análisis de los lixiviados procedentes del lavado de serrines de granito muestra que no superan los valores máximos permitidos en residuos inertes, de acuerdo con lo prescrito por la Directiva 1999/31/CEE (2003/33/CE). Además, la concentración de ciertos elementos tóxicos recogidos por la citada Directiva, es mayor en el agua de poro que en los lixiviados. Por tanto, los serrines actúan adecuadamente como barrera geoquímica frente al transporte e inmovilización de ciertos contaminantes.

4 El análisis composicional, tanto del agua de poro como la lixiviada en serrines de granito, incluye entre los cationes mayoritarios el bromo. Su procedencia se asocia con las inclusiones fluidas presentes en los minerales del granito original, liberadas durante los procesos de elaboración de la piedra. Los serrines quedarían enriquecidos con soluciones salinas de bromo, entre otros elementos. Su alta concentración convierte al bromo en trazador natural de lixiviados de serrines de granito, con especial interés desde el enfoque de monitorización de ensayos a gran escala.

5 El análisis textural y composicional en serrines de granito envejecidos, ha permitido identificar formaciones de costras de oxidación (*hardpans*), preferencialmente ligadas a zonas donde el material se encontró en contacto directo con la atmósfera. El efecto de estas mineralizaciones en los sistemas estudiados ha permitido establecer conclusiones particulares de naturaleza diversa:

5.1 Los *hardpans* actúan como cemento sobre los granos propios de los serrines, generando una reducción parcial de la porosidad del material y, consecuentemente, un descenso en su permeabilidad.

5.2 El encostramiento se ha observado también en materiales en contacto con los serrines de granito. El análisis estructural y mineralógico de una capa de grava afectada por la acción de las soluciones acuosas de los serrines, permitió reconocer un cambio en la fábrica original del material granular hacia una textura grano-portante por una matriz cementante (*hardpans*). Ello implica un aumento en la cohesión y una disminución de la permeabilidad, ambos factores positivos desde el punto de vista del uso planeado para la barrera.

5.3 Los oxi-hidróxidos de hierro formados son susceptibles de actuar como filtros de ciertos contaminantes (Cr, Mo, Hg, etc.), de acuerdo con sus propiedades superficiales. Asimismo, los propios serrines de granito actúan como filtros de metales, a la luz de su comportamiento eléctrico superficial.

6 Los diseños experimentales empleados en el transcurso de la investigación han permitido reunir una importante cantidad de información pertinente al problema investigado, contribuyendo al análisis en profundidad de distintos problemas de índole hidrogeoquímica, hidrodinámica y/o mineralógica. El estudio del alcance de los distintos modelos experimentales, instrumentos y metodologías empleadas, permite concluir aspectos particulares de cada uno de ellos:

6.1 La columna para el análisis unidimensional del comportamiento hidrodinámico y geoquímico en materiales granulares no consolidados desarrollado en el BGR (Hanover, Alemania), ha permitido reconocer de forma precisa el comportamiento de los serrines de granito frente a procesos de imbibición desde un estado deshidratado. Para ello se han empleado herramientas no intrusivas para el seguimiento de la conductividad eléctrica del agua y el contenido volumétrico de agua en el suelo. Su diseño permitió, además, extraer y analizar el agua intersticial de los serrines, a partir de los cuales se establecieron relaciones entre componentes disueltos y otras variables del sistema.

6.2 El uso de instrumentos de caracterización de detalle (escáner de rayos-X), ha permitido el reconocimiento de las propiedades físicas del material con precisión, determinándose la curva de conductividad hidráulica-humedad de los serrines de granito a las condiciones de ensayo mediante un nuevo método experimental, empleando muestreadores Rhizon como herramienta de trabajo. Las curvas exponenciales $K - S_w$, determinadas a partir de técnicas hidráulicas convencionales, fueron validadas de modo satisfactorio mediante el modelo de Mualem-Van Genuchten (MVG).

6.3 El dispositivo experimental de columna con sensores de humedad y succión ha permitido monitorizar el avance del flujo a través de los serrines de granito con un control detallado de los balances hídricos simulados. Para ello, se han empleado técnicas de muestreo de tipo intrusivo, las cuales han dado buenos resultados en el caso de las sondas de capacitancia. Sin embargo, los sensores de succión han mostrado respuestas erráticas debido al rango de humedades para el cual han sido diseñados, inferior al de las condiciones evaluadas durante los ensayos de hidratación en serrines de granito.

6.4 El tanque de electrodos, dispositivo experimental desarrollado en el BGR (Hanover), ha permitido valorar el comportamiento de los serrines de granito bajo condiciones de hidratación controladas, sin interferir de manera significativa en la dinámica natural del sistema gracias al carácter no intrusivo de la técnica. El procesado de los datos eléctricos, a partir de aproximaciones empíricas calibradas para los serrines de granito, ha permitido transformar los datos de señal eléctrica en grado de saturación, evaluándose de modo cuantitativo el avance del frente de infiltración a través de la columna de serrines.

6.5 Se ha diseñado y construido un dispositivo experimental para la simulación del comportamiento termo-hidro-mecánico de barreras de materiales finos para la impermeabilización y sellado de vertederos, objeto de una patente de invención (ES-2345472-B1; Juncosa *et al.*, 2011). Con él se ha construido una barrera capilar empleando serrines de granito y arena. Este equipo ha demostrado ser una herramienta de trabajo de gran utilidad. Su robustez ha permitido el empleo de maquinaria convencional de compactación durante la puesta en obra del experimento (vibroapisonador; bandeja vibrante), lográndose condiciones iniciales de ensayo cercanas a las alcanzables en contextos de obra civil. En la misma línea, la reproducción de series históricas de lluvia mediante un sistema automático de simulación de caudales acoplado a un sistema de riego por nebulización, ha permitido establecer condiciones de ensayo realistas en el laboratorio. La instrumentación empleada en la monitorización del avance del frente de infiltración a través de la barrera ha ofrecido, nuevamente, buenos resultados en el caso de las sondas capacitivas y poco útiles en el de los psicrómetros.

3 OTRAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Dentro del programa sectorial de investigación aplicada PEME I+D e I+D Suma, de la Xunta de Galicia, la Fundación Centro Tecnolóxico do Granito ha recibido una subvención para financiar una actuación relacionada con la ejecución de un “Ensayo piloto a escala real de serrines de granito en obra vial” (código 10MDS007CT).

Dicha actuación se realizará al amparo de los resultados obtenidos en este proyecto y otras actividades previas (Navarro *et al.*, 2008; Barrientos *et al.*, 2010).

Según la caracterización llevada a cabo, los serrines cumplirían con lo establecido en el artículo 330 (terraplenes) del pliego de Prescripción Técnicas Generales para la construcción de carreteras y puentes, PG-3, en cuanto a que, a pesar de que teniendo en cuenta su índice plástico el material quedaría encuadrado dentro de la categoría de marginales, el mismo pliego incluye y acepta como material de construcción este tipo de materiales a juicio del Director del Proyecto y/o las Obras. Tal y como recogen las especificaciones del artículo 330, la falta de experiencia con estos materiales, así como la imposibilidad de recoger en un pliego de prescripciones generales un mayor número de especificaciones, obliga a tomar ciertas precauciones a fin de paliar incertidumbres. Estas precauciones pasan por el denominado estudio especial del material de categoría marginal, específico para cada aplicación.

La ejecución de ensayos piloto en los que se prueben a escala real y en condiciones naturales el comportamiento de los materiales estudiados, permiten reconocer pautas de comportamiento específicas de éstos en contextos particulares.

El desarrollo de obras viales en Galicia aparece como una interesante posibilidad de aplicación para los serrines de granito como material de relleno o para núcleos de terraplenes. Su limitado coste de transporte y disponibilidad lo convierten en un material de gran interés. Bajo esta premisa se planteó la realización de un ensayo piloto en el que se utilicen los serrines de granito durante el proceso de construcción de un tramo de obra vial, monitorizado durante un cierto periodo de tiempo. En relación con este propósito, el director del área de Infraestructuras de la Diputación de Pontevedra ha dado consentimiento al proyecto propuesto, para el que se facilitará un tramo de vía pública en construcción sobre el que desarrollar el ensayo piloto.

El proyecto propuesto estará focalizado en la instrumentación, monitorización y evaluación de resultados, de una carretera de baja densidad de tráfico, empleando serrines de granito como núcleo de terraplén durante el proceso constructivo. Se trata, por tanto, de un ensayo de demostración y verificación de las conclusiones alcanzadas hasta la fecha.

La planificación inicial, a la espera de una mayor definición del pliego de prescripciones técnicas, considera un tramo de no más de 100 m de carretera. Sobre este tramo se observará el comportamiento diferencial de una sección de terraplén construida con serrines, comparado con las de otras anexas, empleando materiales de proyecto. La evolución del

sistema será estudiada a lo largo de un periodo significativo de tiempo (2 años), lo cual permitirá establecer pautas de comportamiento de los serrines en ese uso concreto.

La elección de la instrumentación necesaria y la elaboración de un completo plan de control, incluyen el uso de placas de carga, implantación de sensores de humedad, miras de nivelación o el uso de un escáner para análisis de las superficies.

Este ensayo-piloto representa una demostración práctica, a escala real, del uso de los serrines de granito como material de construcción. Con independencia del resultado final (que auguramos positivo), esta actuación supone un cierto fin de ciclo en el que, partiendo de la caracterización básica, hemos avanzado en el conocimiento del comportamiento de estos materiales, definiendo usos prácticos, para culminar en lo que, hasta ahora, sería la demostración de uno de sus potenciales usos.

Los trabajos desarrollados en esta memoria y en otros trabajos paralelos (Vázquez, 2005; Barrientos, 2007; Carro, 2009), abren otras posibilidades de aplicación práctica, entre las que se encuentra su uso como enmiendas alcalinizantes, tratamiento de aguas ácidas o la estabilización de residuos.

Se trata, pues, de la culminación de un esfuerzo de varios años en los que se ha tratado de mejorar el ciclo de valor de la piedra natural en una región en la que esta actividad constituye un medio de vida y una fuente de riqueza.

CAPÍTULO
7

GENERAL DISCUSSION AND CONCLUSIONS

1 Results Assesment	161
1.1 Summary of Experimental Results	161
1.2 Legal Context for Landfill Disposals	163
1.3 Granite Fines as Mineral Barriers in Waterproofing Landfills	164
2 Conclusions	165

1 RESULTS ASSESMENT

The experimental setups that have been carried out have allowed the development of controlled tests which have recollected large and varied information concerning the behavior of granite fines as waterproof barriers potentially used in sanitary landfills and other purposes.

The results, which have been discussed in detail in each chapter, include aspects concerning the performance of the experimental setups and the instrumentation used, as well as properties shown by the material when submitted to the specific test conditions.

According with the aims presented at the beginning of this report, we present in this section a summary assessment of the work performed. For this purpose, the most significant results from the tests have been collated and they are examined in the context of the Spanish regulation that regulates the admission of waste for landfilling (RD 1481/2001).

1.1 SUMMARY OF EXPERIMENTAL RESULTS

The results obtained during the investigation have allowed the evaluation of different properties of granite fines, as well as their behavior under specific environmental conditions. Without taking into account the analysis of the efficiency of the instrumentation and the sampling techniques that were used, we will focus on the particular aspects displayed by the granite fines from the hydrogeochemical, hydrodynamic and mineralogical points of view.

1.1.1 HIDROGEOCHEMICAL ANALYSIS

The characterization of the saw dust leachate has shown that they never exceed the maximum concentration levels for inert residues, according to the EU Directive 1999/31/CEE (2003/33/CE). The same happens with the concentrations observed in the pore waters, where all the elements analyzed, with the exception of Cr, never attain the maximum allowable concentration in normalized percolation tests.

In the same way as the Cr, many metals appear preferably concentrated in the pore water instead of the free draining water, which shows that these constituents tend to be retained in the material. Therefore, granite fines are used as a possible geochemical barrier for their immobilization.

The analysis of saw dust pore water let us identify bromide as a relevant anion. Its origin can be related with cracking fluid inclusions present in the original granite minerals. The fluid resident in them would be released during the rock elaboration processes (cutting and polishing). Whatever its origin, its high concentration makes it a natural tracer to track water circulation trough or from the granite fines.

1.1.2 HYDRODYNAMIC ANALYSIS

Hydrodynamic aspects have focused on the determination of hydraulic properties such as hydraulic conductivity and field capacity, under the test conditions. The capillary retention effect, which is produced when granite fines are combined with sandy materials with significantly higher permeability, has also been analyzed.

Our results differ from those obtained by Barrientos (2007), who derived his data from oedometer tests ($K_s < 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$). He suggested an approximate value of $\sim 6 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ as the most unfavorable estimation for the saturated hydraulic conductivity, under normal proctor compaction conditions. However, the same author presents an additional field value of $\sim 4 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ obtained from a Lefranc test conducted in a non-compacted granite fine landfill. This value agrees fairly well with the most favorable estimations achieved in the experimental column tests developed in this work.

This difference highlights the importance of establishing similar compaction conditions compaction in order to evaluate the hydrodynamic behavior of non-cohesive materials. In the case of the oedometer tests carried out with granite fines, its small-scale nature as well as the associated high compaction efficiency might not be representative of the achievable permeability for larger scales and when less efficient compaction methods are used.

It is well known that hydraulic conductivity decreases with material humidity (non saturated hydraulic conductivity). We have experimentally proved that, above 40% of volumetric content in water, the granite fines lose their retention capacity, and water drains by gravity. Therefore, this value would represent the field capacity of the granite fines. The hydraulic conductivity of the granite fines, for this humidity, decreases to $\sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$.

The field capacity and the relatively high hydraulic conductivity of granite fines were evaluated once again from a different approximation, taking into account capillary processes. A capillary barrier was constructed using granite fines as fine cover, overlain on a layer of inclined, compacted, sand and leaving an interface between both materials with a regular slope of 11%. Our results show that, the water infiltrated throughout the granite fines layer ($\sim 1.9 \text{ m}^3$ during the test), drained laterally in the direction of the fines/sand interface. Therefore, for the adopted configuration, the efficiency of the capillary barrier was of a 100% during the test run time (6 months).

1.1.3 STRUCTURAL AND MINERALOGICAL ANALYSIS

The textural and mineralogical analysis carried out on polished sections made from samples of granite fines extracted from experimental columns, allowed us the identification of hardpan development in areas where the material is in direct contact with the atmosphere. These formations, produced by the oxidation of the steel particles present within the granite fines or associated to the weathering of Fe-bearing minerals, cement the grains of the saw dust. As a

consequence, the porosity is reduced, causing a small decrease in the permeability of the system.

The crusts were also identified in the gravel used as drainage layers in some experimental columns due to the action of the granite fines leachate. Therefore, the original fabric of the gravel was modified, reinforced by the newly formed cement (grain-bearing texture).

As a consequence, taking into account that crust formation is not associated with any significant expansion of the material, they represent an improvement in the behavior of the system because they improve the overall strength and, due to their sorptive properties, may act as a sink of certain trace elements.

In this line of research, it is interesting to note the results of Vazquez et al. (2008), whom presented results concerning the determination of the isoelectric point of granite fines. According to these authors, the isoelectric point about the pH (i.e., the pH value for which the electric charge on the surface of a material is zero), presents a value of about 4, with the granite fines showing negative net charge for higher values and positive net charge for lower ones. In the test conditions developed, where the pH of the pore water is high (~11), the cationic species should be preferably retained. This explains the cationic enrichment observed in the compositional analysis of the pore water of granite fines.

1.2 LEGAL CONTEXT FOR LANDFILL DISPOSALS

Royal Decree 1481/2001 (RD 1481/2001), which transpose the 1999/31/EC Directive to the Spanish Regulation, reads: *"In the framework of the 10/1998 Law, from the 21st April, of Residues, and other applicable regulation, particularly the law on integrated prevention and pollution control, the present Royal Decree establishes a legal regime that must be applied to waste disposal activities by dumping waste in landfills. Also, it sets minimum technical criteria for its design, construction, exploitation, closure and maintenance..."*

There, a landfill is defined as a waste disposal facility, with a subterranean or superficial deposit, for periods of more than one year (when its final destination is the elimination), two years (when its final destination is valorization of non-hazardous waste), and for a period exceeding six months (hazardous waste). Based on this consideration, landfills are classified as: hazardous waste landfills, non-hazardous waste landfills and inert waste landfills.

Annex I of RD 1481/2001 establishes the general requirements for all types of landfills, and states that: *" A landfill must be located and designed so that it satisfies the necessary conditions to prevent soil, groundwater or surface water contamination and it ensures an efficient collection of leachate ... The protection of the soil, groundwater and surface water during the active or operating phase of the landfill will be achieved by combining a geological barrier and an artificial coat sealed under the mass of waste. "*

Geological barriers are natural barriers with enough attenuation capacity to prevent a risk of contamination of the soil and groundwater of the surrounding environment. In the case of landfills, the risk zones are located at the base and sides of the waste storage area.

According to RD 1481/2001, concerning the protection of the soil and the water in the environment, the sides of the landfill will have a mineral layer with combined conditions of hydraulic conductivity (k) and thickness (P) in terms of protection of soil, surface water and groundwater, in such a way that it is at least equivalent to those derived from the following requirements:

- a. Hazardous waste landfills: $k \leq 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$; $P \geq 5 \text{ m}$.
- b. Non-hazardous waste landfills: $k \leq 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$; $P > 1 \text{ m}$.
- c. Inert waste landfills: $k \leq 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$; $P \geq 1 \text{ m}$.

In addition, when the geological barrier does not meet these conditions, it might be complemented with an artificial geological barrier, consisting of a mineral layer with $P \geq 0.5 \text{ m}$.

1.3 GRANITE FINES AS MINERAL BARRIERS IN WATERPROOFING LANDFILLS

The RD 1481/2001 stipulates that the protection of soil and water (either ground or surface waters) will be achieved by combining a geological barrier with an artificial carpet at the base of storage.

According to legal requirements, the results concerning the hydraulic conductivity of granite saw dust (experimentally obtained in the course of our work) suggest that the fines would not meet the minimum waterproofing requirements for mineral barriers of landfills.

However, this RD 1481/2001 does not impose that the waterproof barrier must be monolithological. It also points out that the combined effect of permeability and thickness of the barrier must be equivalent to the limit values presented in the previous section.

Such equivalence may be achieved by combining mineral layers that produce an opposition effect to flow, which is the aim of the low-permeability materials presented in this context.

Capillary barriers are an example of flow reduction system. Our work shows its viability, even under environmental conditions of high precipitation. Specifically, the analysis of the instrumental records shows that the system works adequately, at least during the testing period (6 months). During this time, the barrier had an average equivalent permeability of less than 10^{-8} m s^{-1} , also showing a progressive and slight decrease.

According to the permeability and thickness requirements for mineral barriers given by RD 1481/2001, granite sawdust interlayered with sand, making up a capillary barrier, would be suitable for waterproofing and/or sealed, at least for inert waste landfills. The feasibility of

such devices for their use in non-hazardous waste landfills and hazardous waste sites should be more rigorously evaluated in terms of durability. The management of leachate should also be taken into account, as well as the study of the interactions between the reactive leachate and the barrier material.

The advantages of using granite fines instead of other materials (synthetic or natural) are varied in nature:

- ◆ It provides added value to an inert waste, giving a sustainable and positive contribution in the value chain of dimension stone. Therefore, it is a sustainable and respectful approach with the environment.
- ◆ Due to the concentration of processing industries, there is enough availability, which reduces the costs of implementation if its use is in areas geographically close to the industrial location.
- ◆ As we have already mentioned, the crusts observed and their electrical characteristics, allow them to act as filters for the retention of certain contaminants (e.g. metals).

The final application of our results requires the development of a pilot field study, with the assistance of the responsible authorities.

2 CONCLUSIONS

The following are the main conclusions of our study.

1 The hydraulic conductivity values experimentally determined by the controlled laboratory tests with granite fines under different degrees of compaction and moisture, have exhibited higher values than the maximum ones required for the use of mineral barriers as insulators in the sides of landfills, according to RD 1481/2001. Therefore, the use of granite fines as a single mineral barrier for the waterproofing and/or sealing landfills is not advisable. This first point is based on the following specific findings:

1.1 The vibrating + compaction rammer impact offered the most favorable results in terms of density and homogenization (void ratio ~ 1.1), using partially saturated granite fines. According to Barrientos (2007), under these conditions, granite fines would present a coefficient of permeability $\sim 4 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ applying the Kozeny-Carman equation, which represents the worst case in terms of waterproofing. This value is greater than the limit value for mineral barriers in landfills (10^{-7} m s^{-1}), as it is reflected in RD 1481/2001.

1.2 The use of non-intrusive sampling techniques with 3D spatial resolution

(geoelectrical method), suggests that, in the early stages of hydration, preferential flow paths form in those layers with low initial moisture compacted to a modified proctor energy equivalent. These structures are conditioned by the heterogeneous distribution of the moisture in the material or its differential compaction, tending to be attenuated while moisture increases due to the homogenization effect induced by the water distribution.

1.3 The field capacity estimated for granite saw dust indicates that this material is able to retain water until it reaches ~70% of its total porosity. In general, once this value is exceeded, the water freely drains by gravity. The hydraulic conductivity in these conditions is $\sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$. Although this value is lower than that imposed by the RD 1481/2001, it could only be taken into account in the case of confined beds that allow drainage.

2 According to the premise of equivalence stated in RD 1481/2001 about the mineral barrier effect, in terms of permeability and thickness of the layers, as well as the absence of legal constraints to combine different materials and/or their geometrical arrangement, the granite fines combined with sand forming a capillary barrier are suitable for waterproofing and/or sealing, at least, inert waste landfills. The specific results that support this statement are:

2.1 The studied capillary barrier has proved to be an effective configuration for lateral deviation of infiltration for the simulated test conditions: high precipitation with a total discharge of $\sim 1.9 \text{ m}^3$; test duration close to six months; barrier with $\sim 0.5 \text{ m}$ of total thickness; interface granite fines/sand with a $\sim 11\%$ slope. This corresponds to an equivalent permeability of $< 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ for the capillary barrier, lower value than that required for sealing mineral barriers used in inert waste landfills.

2.2 The theoretical study carried out using the initial and final test data, reflects how the increase in moisture of the granite fines was not enough to destabilize the system. The condition of pressure equilibrium between both materials, from which the hydraulic conductivity of granite fines starts to become smaller than that of the sand, allowing the movement of the vertical flow, is found at volumetric water contents close to 45%, while the peak value reached by the barrier is 42%. This suggests that the barrier would work efficiently for longer than the test period considered (6 months).

3 The characterization of the leachate of the granite saw dust has shown that, according to Directives 1999/31/CEE and 2003/33/EC, these never exceed the maximum concentration levels for inert residues. Also, the concentration of certain toxic elements

covered by the cited regulations is higher in the pore water than in the free draining water. Therefore, the granite fines properly act as geochemical barriers against the transport and immobilization of certain contaminants.

4 The compositional analysis of both the pore water and the granite fines leachate includes bromide as a relevant anion. Its origin is associated with the crushing of fluid inclusions originally present in the original granite minerals. The fluids contained in them (eventually reach in Br) would be released during the rock elaboration processes. Because water is kept in a closed circuit during the cutting and polishing operations, Br would tend to concentrate in this water that partially accompanies the sawdust when they are separated. Therefore, the fines would be enriched with salt solutions of bromine, among other elements. Its high concentration makes bromine a natural tracer of the granite fine's leachate, which is particularly interesting from the monitoring of large-scale tests.

5 The textural and compositional analysis in aged granite fines, allowed the recognition of hardpans, which appear to be preferably linked to areas where the material was directly in contact with the atmosphere. The effect of this mineralization in the studied systems has allowed to establish various types of particular findings:

5.1 The hardpans act as cement for the grains of saw dust, generating a reduction of its porosity and, consequently, a decrease in its permeability.

5.2 Mineral crusts have also been observed in materials in contact with the granite fines. The structural and mineralogical analysis in a layer of gravel affected by the action of aqueous solutions coming from granite fines, allowed the recognition of a change in the gravel's original fabric into a grain-bearing binder matrix (hardpans). This implies a discrete increase in the cohesion and a reduction in the permeability, both positive factors from the point of view of the intended use for barriers.

5.3 The oxy-hydroxides that conform the hardpans likely act as sinks for certain contaminants (Cr, Mo, Hg, etc.), according to their surface properties. Also, granite fines themselves act as filters of metals, due to their surface electrical behavior.

6 The experimental setups carried out during the course of the investigation lets compile a large amount of information that contributes to an in-depth analysis of various problems in the fields of hydrochemistry, hydrodynamics and/or mineralogy. The study of the different experimental models, instrumentation and methodologies used allows the conclusion of particular aspects concerning each one:

6.1 The column for the one-dimensional analysis of the hydrodynamic and geochemical behavior of unconsolidated granular materials developed at the BGR (Hannover, Germany), has allowed us to accurately recognize the behavior of granite fines under imbibition processes from a dehydrated state. For this purpose, non-intrusive tools have been used to monitor the electrical conductivity of the water and moisture's evolution. Also, its design allowed us to extract and analyze the granite fine's pore water, from which the relationship between dissolved constituents and other system variables was established.

6.2 The use of detailed characterization tools (X-ray scanner) has allowed the accurate recognition of the material's physical properties, determining the hydraulic conductivity-moisture curve of granite fines in the test conditions using Rhizon samplers as working tool. The $K - S_w$ exponential curves, determined from conventional hydraulic techniques, were satisfactorily validated by the Mualem-Van Genuchten (MVG) model.

6.3 The humidity and suction transducers installed in the experimental column allowed us the monitoring of flow advance through the granite fines with a detailed control of the simulated water balances. Capacitance probes proved to provide an accurate description of the hydration process while the suction sensors showed erratic responses due to the humidity range for which they were designed (lower than the assessed hydration conditions tested with granite fines).

6.4 The electrode tank, which was developed at the BGR (Hannover), allowed us the evaluation of the behavior of granite fines under controlled hydrating conditions, without interfering with the natural dynamics of the system due to the non-intrusive technique that was used. The processing of the electric data, based on a pre-calibration with the granite fines, allowed us the transformation of the electrical signal into a degree of saturation data and, therefore, help in the quantitative assessment of the advance of the infiltration front through the column of fines.

6.5 An experimental device to simulate the thermo-hydro-mechanical barriers of fine materials for waterproofing and/or sealing landfills was designed and patented (ES-2345472-B1; Juncosa *et al.*, 2011). With this device, we have constructed a capillary barrier combining a sand layer overlain by granite fines plus. This device has been proven to be a versatile and useful tool. Its robustness allowed us to use conventional compaction equipment during the setup of the experiment (tamping or vibrating rammers), achieving initial test conditions close to the ones typical in conventional earth

works. In the same line, the reproduction of historic rainfall series by an automatic flow simulation tool coupled to a spray irrigation system, allowed us the establishment of realistic test conditions in the laboratory. The instrumentation used for the monitoring of the progress of the infiltration front throughout the barrier has reported, once again, good results for the capacitance probes and not so useful results for the psychrometric transducers.

ANEXO

I

EL ENSAYO PRÓCTOR EN CALIBRACIÓN INSTRUMENTAL

Anexo I.A Medida de la Densidad de Suelos de Grano Fino Empleando un Escáner-Láser 3D	177
1 Introducción	177
2 Materiales y Métodos	178
2.1 El Escáner Láser 3D	178
2.2 Muestras de Suelo. Determinación de Densidades	181
3 Resultados	182
4 Resumen de los resultados obtenidos	185
Anexo I.B Calibración de la Respuesta Eléctrica de los Serrines de Granito	187
1 Introducción	187
2 Materiales y Métodos	188
2.1 Herramienta SIPLab	188
2.2 Adquisición de Datos	189
2.3 Aproximaciones Empíricas	190
3 Resultados	191
4 Resumen del Proceso de Calibración	193
Anexo I.C Calibración de Sondas de Capacitancia para los Serrines de Granito	195
1 Introducción	195
2 Materiales y Métodos	196
2.1 Sonda ECHO EC-5	196
2.2 Adquisición de Datos	197
3 Resultados	197
4 Resumen del Proceso de Calibración	198

1 CALIBRACIÓN INSTRUMENTAL

Por calibración entendemos el conjunto de operaciones que establecen, en unas condiciones especificadas, la relación que existe entre los valores indicados por un instrumento o sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada, y los correspondientes valores conocidos de una magnitud de medida. El proceso de calibración requiere de un ajuste que lleve a la igualdad entre el valor medido y el patrón de referencia, o bien el enunciado de un factor o función de corrección que debe ser aplicado tras realizar la medición.

Los principales indicadores de calidad en un proceso de calibración son el sesgo y la precisión de los datos. La precisión es un término que expresa la medida del grado de concordancia entre análisis repetidos de una muestra, expresada normalmente como la desviación estándar. Por su parte, el sesgo es la desviación consistente de valores medidos a partir del valor verdadero, originada por errores sistemáticos durante un procedimiento. De la combinación de ambos obtenemos la exactitud, que refleja, en un proceso analítico, la proximidad de un valor medido a un valor verdadero (APHA *et al.*, 1992).

Los trabajos de investigación con diseños experimentales requieren del empleo de técnicas de muestreo basadas en señales instrumentales variables, en función del medio en el que son aplicadas. Por lo tanto, la calibración instrumental en este tipo de estudios determina la calidad de los resultados.

1.1 NORMALIZACIÓN Y TRAZABILIDAD

La ASTM¹ define la normalización como el proceso de formular y aplicar reglas para una aproximación ordenada a una actividad específica para el beneficio y con la cooperación de todos los involucrados. Por su parte, la ISO² considera la normalización como la actividad que tiene por objeto establecer, ante problemas reales o potenciales, disposiciones destinadas a usos comunes y repetidos, con el fin de obtener un nivel de ordenamiento óptimo en un contexto dado, que puede ser tecnológico, político o económico.

Los objetivos que persigue la normalización son, en esencia, la simplificación de los modelos reduciéndolos sólo a aquellos necesarios, la unificación a nivel internacional y la especificación con la que se crea un lenguaje claro y preciso que persigue evitar errores de identificación.

La ISO define la trazabilidad como la propiedad del resultado de una medida o del valor de un estándar donde éste pueda estar relacionado con referencias especificadas, usualmente estándares nacionales o internacionales, a través de una cadena continua de comparaciones con incertidumbres especificadas.

¹ American Society for Testing and Materials (www.astm.org).

² International Organization for Standardization (www.iso.org).

Este concepto hace referencia al hecho de que se deben realizar medidas trazables respecto a un patrón o referencia que, a su vez, se calibra respecto a otro patrón de superior funcionamiento o estabilidad. Esta cadena conduce a patrones nacionales y, en último caso, a un sistema de unidades y patrones de referencia internacionalmente acordados.

2 EL ENSAYO PRÓCTOR

De entre los métodos de laboratorio empleados para medir la compactación en suelos, destaca el ensayo próctor. Validado por la ASTM y la UNE-EN (ASTM-D698 y UNE-EN 103500-1994, para próctor normal; ASTM-D1557 y UNE-EN 103501-1994, para próctor modificado), este método es internacionalmente aceptado para establecer la relación existente entre la densidad seca y el grado de humedad específico para cada tipo de suelo, bajo condiciones estándar de compactación ($600 \text{ kN}\cdot\text{m m}^{-3}$ para próctor normal; $2700 \text{ kN}\cdot\text{m m}^{-3}$ para próctor modificado).

El ensayo consiste en utilizar un molde de dimensiones normalizadas en el que se dispone una mezcla del material objeto de análisis y agua, previamente preparada, que es sometida a un proceso de compactación aplicando una energía definida por el peso de la maza próctor, la altura de caída y el número de golpes. Repitiendo este procedimiento con contenidos de agua variable se obtiene una curva que relaciona la humedad y la densidad seca de las muestras generadas, con la que se determina el valor óptimo de humedad-densidad próctor.

El empleo de esta técnica está relacionado con la determinación de la humedad óptima para la que un tipo de suelo determinado alcanza su máximo grado de compactación, aplicando una energía de referencia (próctor normal o modificado).

Desde el punto de vista del análisis de las propiedades intrínsecas del material, el ensayo próctor permite conocer algunos de los parámetros físicos que determinan el comportamiento del suelo, tales como la densidad, humedad, porosidad o grado de saturación, entre otros. En la Figura A .1 se recogen los principales parámetros físicos y la relación existente entre ellos, que pueden deducirse a partir de los ensayos próctor, conociendo únicamente la densidad media de las partículas sólidas que componen el material.

En tanto que los ensayos próctor generan porciones de suelo con propiedades físicas homogéneas, las muestras extraídas son susceptibles de ser empleadas como patrón en la calibración instrumental de equipos comerciales para la medida de densidad-humedad en suelos. Con este objetivo se plantean una serie de ejercicios de calibración llevados a cabo con serrines de granito a partir de muestras próctor, que quedan recogidos en los apartados a, b y c, del presente Anexo.

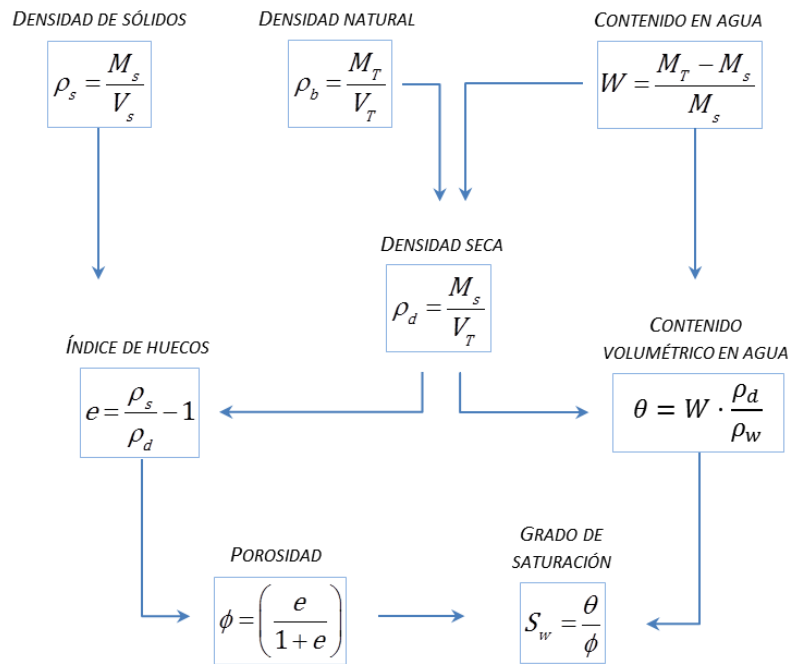


Figura A .1. Esquema de las relaciones entre los parámetros físicos del suelo obtenidos a partir del ensayo próctor. Siendo M_s la masa del suelo seco o de las partículas sólidas; V_s , volumen de las partículas sólidas; ρ_s , la densidad de las partículas sólidas; M_T , masa total de la muestra de suelo; V_T , volumen total de la muestra de suelo; ρ_b , la densidad natural; ρ_d , la densidad seca; ρ_w , densidad del agua; W , contenido gravimétrico en agua (ASTM-D2216, UNE-EN 103300-1993); e , índice de huecos; ϕ , porosidad; S_w , grado de saturación.

◆ ACLARACIONES

El presente estudio se ha llevado a cabo haciendo uso, en todos los casos, de un único molde próctor normal. El desgaste sufrido por el molde ha sido evaluado a través de repetidas medidas de sus dimensiones (antes y después de cada ensayo), obteniéndose un valor de volumen promedio de $1000 \pm 3 \text{ cm}^3$. La balanza utilizada para medir el peso de la muestra próctor tiene una precisión de 0.1 g, mientras que la de la empleada en la determinación de humedades fue de 0.01 g.

A partir de estos datos, y teniendo en cuenta la teoría de propagación de errores en funciones de varias variables, el error relativo de la densidad viene expresado por la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta\rho_b}{\rho_b} = \sqrt{\left(\frac{\Delta M_T}{M_T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_T}{V_T}\right)^2} \quad \text{e. A .1.}$$

La instrumentación empleada permite calcular la densidad a partir de muestras próctor con un error relativo del 0.3%.

Tanto la preparación de las muestras, como el desarrollo de los ensayos próctor normal, se han llevado a cabo haciendo uso de la Norma UNE-EN 103500-1994 (equivalente a la ASTM-

D698). En unos casos, los ensayos se han realizado con compactadora automática y en otros, con maza manual.

Anexo I.A MEDIDA DE LA DENSIDAD DE SUELOS DE GRANO FINO EMPLEANDO UN ESCÁNER-LÁSER 3D

1 INTRODUCCIÓN

La medida de la densidad in situ de una muestra de suelo es una tarea que, históricamente, ha sido abordada a través de diferentes métodos. La principal diferencia entre las distintas técnicas empleadas radica en la necesidad de perturbar la fábrica original del suelo para realizar la determinación, así como la precisión de cada una de ellas. Por ello, los métodos empleados pueden ser clasificados en función del grado de perturbación que introducen en la muestra y su precisión. Por *métodos destructivos* entendemos aquellos que necesitan de la extracción de una muestra para poder determinar su densidad, mientras que los *métodos no destructivos* son aquellos que no alteran la fábrica del suelo durante la medición. Teniendo en cuenta el concepto de volumen elemental representativo referido a una porción de suelo, cabe esperar que la representatividad de la muestra sea proporcional a su tamaño y a la homogeneidad del suelo en cuestión.

Entre los métodos destructivos más comúnmente empleados para la determinación de la densidad in situ de un suelo destacan el del cono de arena (ASTM-D1556, UNE-EN 103503-1995) o el balón de caucho (ASTM D2167 – 08). En ambos casos, el principio de funcionamiento, consiste en generar una cavidad en el suelo objeto de estudio, la cual es rellenada con un material estándar sobre el que se realiza la medición. La ASTM especifica la necesidad de que este tipo de pruebas, cuando son desarrolladas sobre el terreno, sean controladas a través de ensayos de compactación en laboratorio (próctor normal ASTM D698, UNE-EN 103500-1994; próctor modificado ASTM D1557, UNE-EN 103501-1994).

Menos destructivas son otras técnicas como la sonda de neutrones (ASTM D6938 – 10) o la tomografía de rayos-X (ASTM E1441). En contraposición con los métodos destructivos, estos cuentan con la principal ventaja de su alta precisión. Sin embargo, presentan una serie de inconvenientes entre los que cabe destacar el alto coste instrumental, la complejidad de su despliegue en el campo y la necesidad de formación previa, bajo determinados requisitos de protección radiológica.

En este trabajo presentamos un nuevo método para la determinación de la densidad de muestras de suelo, empleando un escáner láser 3D. Para ello hemos empleado el equipo Polhemus 3Face FastScann, cuyo uso se valida a partir de muestras de serrines de granito compactados en condiciones próctor normal. Con esta nueva técnica pretendemos aportar un método híbrido que minimiza el efecto perturbador de los métodos destructivos tradicionales y que, además de realizar medidas de alta precisión, mejora las facilidades de uso de los métodos no destructivos.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 EL ESCÁNER LÁSER 3D

El equipo empleado es un escáner de superficies en 3 dimensiones (Polhemus FastScan), el cual emite un haz de láser plano que es proyectado sobre la superficie de una muestra, generando un perfil cuya imagen es detectada por una cámara CCD¹. Con el movimiento conjunto de la cámara y el láser es posible realizar un barrido completo de la superficie de interés. Los datos registrados son convertidos por un software integrado, en una malla regular susceptible de postproceso. Mediante la integración de la superficie respecto a la altura de cada uno de los puntos de la malla es posible calcular el volumen de la muestra escaneada.

El equipo empleado está constituido por un dispositivo manual de muestreo compuesto, a su vez, por un transmisor láser, dos cámaras y un elemento de referencia espacial. El sistema permite la digitalización de superficies sólidas opacas mediante tecnología láser y la transformación de la señal en una imagen con la forma del objeto.

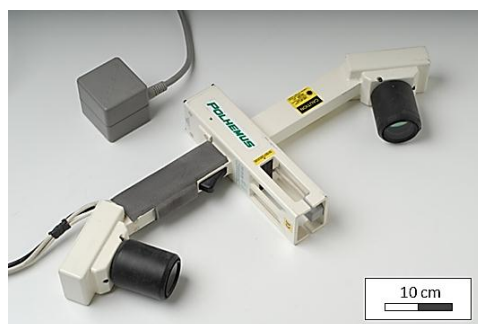


Figura A .2. Polhemus 3Face FastScan. Equipo láser para escanear superficies 3D.

La resolución y, en su caso, el suavizado de la imagen, se realiza por medio del software Polhemus. Éste permite, a su vez, exportar los datos obtenidos bajo distintos formatos (nube de puntos, malla de elementos triangulares con vértice en el punto, etc.).

Distintos trabajos desarrollados con el equipo Polhemus han permitido evaluar la aplicabilidad de esta técnica desde distintos puntos de vista. Entre ellos destacan la corrección de la señal en la medida de superficies sumergidas en agua (González *et al.*, 2007), o el grado en que afecta la composición del material objeto de escáner en la señal (McCallum *et al.*, 1996; McCallum *et al.*, 1998).

Algunos autores han puesto en evidencia que la presencia de campos electromagnéticos cercanos a la herramienta láser durante su uso, pueden generar cierta distorsión aleatoria en el registro (Nixon *et al.*, 1998). Es por ello la necesidad de comprobar la precisión de las medidas en el entorno de trabajo, empleando patrones estándar.

¹ Charge-Coupled Device.

2.1.1 PRECISIÓN DE LAS MEDIDAS

La determinación de la precisión del escáner 3D se llevó a cabo mediante una campaña de medidas sobre muestras patrón cuyas geometrías eran conocidas con una alta precisión. Este análisis tiene por objeto el determinar los parámetros de la herramienta láser (resolución y suavizado), que mejor ajustan las geometrías calculadas y las teóricas, así como establecer un método de interpolación que permita calcular volúmenes con la mayor precisión posible, de modo sistemático.

Las muestras patrón empleadas consisten en dos poliedros de plástico con morfología piramidal y base plana. Fueron elaborados específicamente para este estudio en un torno de precisión 0.1 mm: P1, pirámide simple; P2, bipirámide (Figura A .3). El volumen teórico de cada patrón se determina mediante fórmulas geométricas básicas.

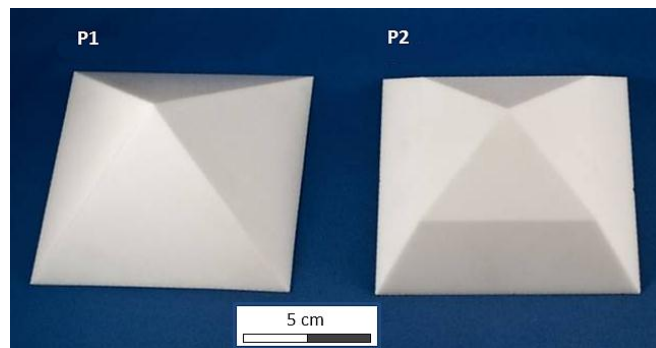


Figura A .3. Pirámides estándar. P1, pirámide simple; P2, bipirámide.

Ambas muestras fueron escaneadas con el equipo láser en repetidas ocasiones, en las que se fueron variando los valores de resolución (RS^b) y suavizado (SZ^a). Los resultados de los barridos fueron exportados como nube de puntos (*.ASCII), con la información de sus coordenadas.

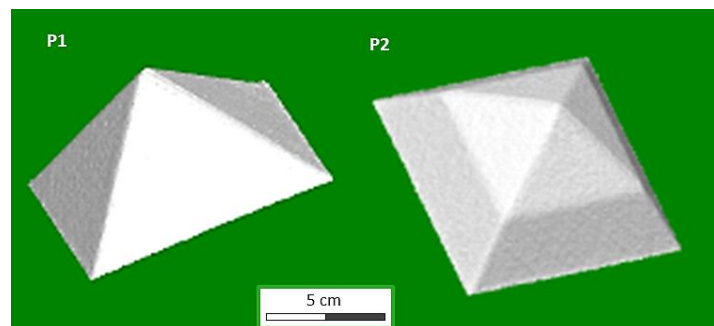


Figura A .4. Ejemplo nube de puntos. P1, pirámide simple; P2, bipirámide.

El tratamiento de datos se realizó con el software comercial *SURFER 8.0¹*, el cual permite transformar una serie de datos espaciales (x, y, z) equiespaciados o no, empleando distintos métodos de interpolación (Yang *et al.*, 2004). El mismo software cuenta con una utilidad para cálculo de volúmenes, la cual hemos empleado para integrar el volumen que envuelve la superficie de cada muestra escaneada.

A partir de la nube de puntos obtenida de cada muestra, se generaron tres matrices regulares (mallas) empleando como método de interpolación el de vecinos naturales (Natural Neighbor, *NN*), el inverso potencial de la distancia (Inverse Distance to a Power, *IDW*) y el kriging (Kriging, *KG*). Cada superficie de interpolación fue integrada para obtener un volumen a partir de su superficie de referencia horizontal. Con los volúmenes obtenidos V_e se evaluó la precisión del modelo volumétrico a través de la diferencia relativa, *RD*, que presenta cada valor respecto de su volumen teórico de referencia, V_t , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$RD = \frac{|V_t - V_e|}{V_t} \cdot 100 \quad \text{e. A. 2.}$$

En los resultados presentados en la Tabla A .1 se observa que los parámetros de resolución y suavizado, empleados durante la exportación de la nube de puntos desde el software Polhemus, minimizan el error relativo cuando para ambos casos se adopta un valor de 1 mm. Por otra parte, el *IDW* es el método de interpolación con el que se consiguen las menores diferencias relativas entre el volumen determinado a partir del escáner de la muestra y su valor teórico.

Tabla A .1. Diferencia relativa (%) entre el valor teórico y el experimental de muestras patrón (pirámides de referencia), en función de los parámetros de ajuste considerados (resolución y suavizado), para los métodos de interpolación Natural Neighbour, Inverse Distance to a Power y Kriging (*KG*).

SZ^a (mm)	RS^b (mm)	NN_{P1}	IDW_{P1}	KG_{P1}	NN_{P2}	IDW_{P2}	KG_{P2}
0.5	0.5	0.80%	0.08%	0.27%	3.07%	0.27%	1.79%
0.5	1	0.82%	0.03%	0.34%	3.08%	0.12%	1.80%
1	1	0.88%	0.04%	0.39%	3.21%	0.12%	0.99%
1	1.5	0.96%	0.03%	0.42%	3.33%	0.86%	1.20%
2	1	1.12%	0.41%	0.43%	3.41%	1.21%	1.15%
2	2	1.29%	0.13%	0.45%	3.70%	3.21%	0.21%

* $P1$ y $P2$, poliedros patrón; RS^b , resolución; SZ^a , suavizado; *NN*, Natural Neighbor; *IDW*, Inverse Distance to a Power; *KG*, Kriging.

¹ www.goldensoftware.com

Estos resultados permiten establecer los criterios para el procesado de los datos del escáner de muestras mediante la herramienta Polhemus: i) resolución y suavizado igual a 1 mm; ii) procesado de datos en SURFER mediante el método de interpolación *IDW*.

2.2 MUESTRAS DE SUELO. DETERMINACIÓN DE DENSIDADES

El estudio de determinación de densidades en suelos de grano fino compactado se desarrolló empleando serrines de granito como material de trabajo y ensayos próctor como método estandarizado (ASTM D698, UNE-EN 103500), empleado como referencia en otros métodos de compactación (ASTM-D1556, ASTM D2167 – 08), para la preparación de muestras.

El procedimiento de generación de muestras fue el normal en la determinación de curvas próctor. Se realizaron mezclas de serrín de granito y agua a distintas proporciones, ejecutando un ensayo próctor para cada una de ellas. En este trabajo se emplearon 2 tipos de serrines de granito¹: con granalla de acero (GF1) y sin granalla (GF2).

El resultado es una muestra de forma cilíndrica de serrín de granito compactado, la cual presenta una densidad aparente y humedad definidas. La muestra, una vez extraída del molde próctor (Figura A .5 [1, 2]), es dividida en dos porciones: una se empleó para determinar el contenido en agua (ASTM D2216, UNE-EN 103300-1993) y otra para el cálculo de su volumen con el escáner láser 3D.



Figura A .5. Elementos del proceso de elaboración de muestras para escáner. [1] Molde próctor; [2] muestra de suelo compactado; [3] muestras para el escáner; [4] herramienta de corte.

La preparación de las muestras para el escáner se llevó a cabo mediante el tallado de submuestras a partir del semicilindro dispuesto para ello. Empleando una herramienta afilada (p.ej. un bisturí o un cúter), una porción del semicilindro fue recortado a modo de pequeña colina de base plana (Figura A .5 [3]) con riguroso cuidado de minimizar la perturbación de las propiedades físicas resultantes de la compactación. El objetivo es que la muestra presente una superficie superior sin cambios de pendiente abruptos y base plana (nótese que la pirámide

¹ La composición de los serrines de granito depende del procedimiento de corte empleado en el taller industrial de procedencia: corte en telares de acero (serrines con granalla); corte con disco diamantado (serrines sin granalla).

patrón de una pendiente P1 fue la que ofreció mejores resultados durante el examen de fiabilidad).

De las submuestras talladas se determinó, en primer lugar, su masa mediante balanza de precisión en el laboratorio. Seguidamente, fueron escaneadas (Figura A .6) y exportadas como nube de puntos (*.ASCII), empleando los parámetros ajustados durante la calibración descrita en la sección anterior. Finalmente, los datos son tratados con *SURFER 8.0* para determinar el volumen de la muestra.

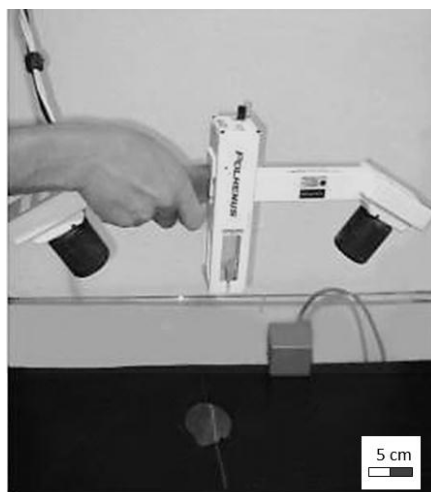


Figura A .6. Escáner láser de una muestra de suelo mediante la herramienta Polhemus FastScan.

A partir del cociente entre el peso y el volumen determinado en cada caso, y los respectivos errores asociados a cada medida, este método permite determinar el valor de la densidad, expresada en términos de densidad natural o densidad seca, con un error relativo del 0.01% (ecuación e. A .1).

3 RESULTADOS

El tamaño muestral final del ensayo lo constituyen 32 muestras próctor: 19 del tipo GF1 y 13 del tipo GF2. De cada una de ellas se obtuvo un valor de densidad mediante el método próctor convencional y otro a partir del escaneado láser. Los resultados obtenidos se analizaron tomando como referencia el valor de la muestra estándar, que en este caso es la densidad próctor, y determinando la diferencia relativa que presenta el valor obtenido experimentalmente respecto al estándar (RD_p). Para ello, empleamos nuevamente la expresión e. A .2.

En la Figura A .7 podemos observar que las muestras ensayadas están comprendidas en un rango de humedad situado entre el 5 y el 32%. El límite superior está marcado por el límite plástico del material, cuyo valor representa el contenido en agua a partir del cual este comienza a ofrecer un comportamiento plástico. Por lo tanto, cuando se supera este valor, la

densidad de la muestra no es representativa en tanto que su valor original puede haberse visto afectado durante los procesos de extracción y corte previos al escaneado.

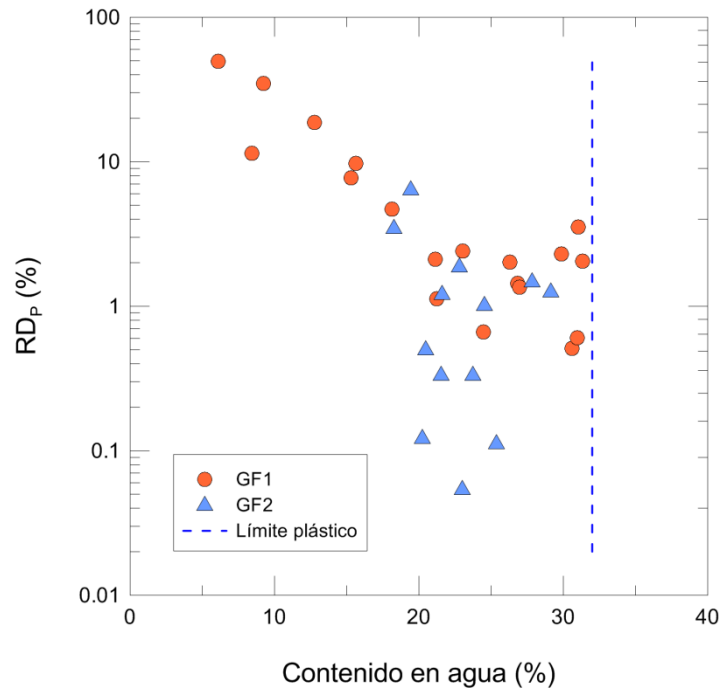


Figura A.7. Diferencia relativa entre la densidad próctor y la experimental, respecto del contenido en agua de la muestra expresado de forma porcentual. GF1 serrines de granito con granalla; GF2 serrines de granito sin granalla. Límite plástico de los serrines de granito (Barrientos *et al.*, 2010).

Cabe señalar que RD_p aumenta a medida que disminuye la humedad para valores inferiores al 20%, aproximadamente. Esto es debido a la falta de coherencia¹ de las muestras próctor. El molde próctor confina las muestras, con lo que es posible determinar su densidad a pesar de presentar un bajo contenido en agua. Sin embargo, son muestras muy inestables durante los procesos de extracción y corte planteados.

Por lo tanto, sólo tiene sentido comparar ambos métodos para muestras que, de acuerdo con su humedad, sean coherentes, y que no sobrepasen el valor del límite plástico. En el caso de los serrines de granito, el rango de aplicación abarca muestras con contenidos en agua comprendidos entre el 20 y el 32%.

En general, las muestras GF2 muestran valores más bajos que las GF1. Para analizar este aspecto, hemos realizado un ajuste lineal de los valores de densidad teórica próctor y los determinados de forma experimental para el rango de contenido en agua considerado (20-32%), indistintamente de si se trata de muestras GF1 o GF2. Los datos, analizados en la Figura A.8, muestran una buena concordancia, en general, con menor dispersión en las muestras GF2. Al ampliar la zona central del ajuste observamos que, en contraposición a las muestras

¹ En suelos se entiende por material coherente aquél en el que el agua absorbida y la atracción entre las partículas, actúan conjuntamente para producir una masa que se mantiene unida y se deforma plásticamente con cantidades de agua variables.

GF2, la mayoría de los valores correspondientes a GF1 aparecen fuera del intervalo de confianza del 95%, con valores para la determinación con el escáner láser superiores a los esperados, de acuerdo con el valor de la muestra próctor de procedencia.

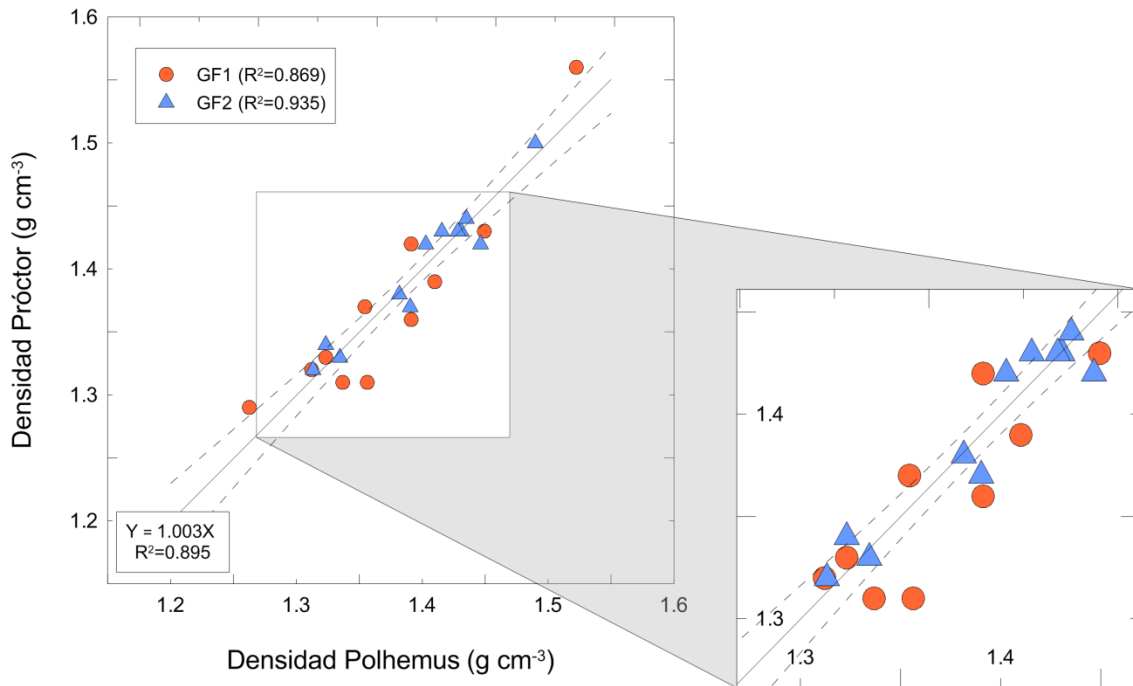


Figura A .8. Comparación entre densidad próctor y escáner láser. GF1 serrines de granito con granalla; GF2 serrines de granito sin granalla. Ajuste lineal de los valores GF1 y GF2 conjuntos, y representación de los intervalos de confianza al 95%.

Esta dispersión en las muestras GF1 está asociada a la composición que presentan este tipo de serrines de granito respecto a GF2: la granalla de acero. Este material presenta una densidad relativamente alta (hasta tres veces superior), en relación a la densidad media de las partículas sólidas típicas de los granitos, que es el caso de GF2. Su distribución en el seno del material no es uniforme, con lo que concentraciones locales de granalla provocan incrementos diferenciales en el valor de la densidad.

Esta anomalía es más acusada cuanto menor es la muestra. Tal efecto, se refleja de forma cuantitativa mediante un incremento del valor de la densidad experimental respecto al esperado (Figura A .8) y, además, de forma visual cualitativa sobre la superficie de las muestras GF1, en las que tras cierto periodo de envejecimiento se forman marcas oscuras como consecuencia de la oxidación de la granalla de acero (Figura A .9).

Por su parte, las muestras GF2 resultan homogéneas independientemente del volumen considerado, ya que carecen de granalla de acero. Sus valores experimentales son, por tanto, más similares al valor próctor de la muestra de origen.

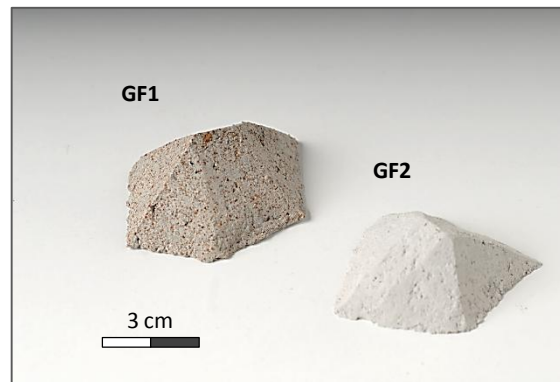


Figura A.9. Muestras de serrines con granalla GF1 (izquierda) que muestran zonas marrones de oxidación; muestra de serrines sin granalla GF2 (derecha).

4 RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha evaluado el alcance de un nuevo método para la determinación de la densidad en suelos compactados de grano fino. La técnica basa su principio en la extracción de pequeñas porciones de material fino compactado de las que se determina su masa mediante balanza de precisión en laboratorio y su volumen a partir de la integración de la superficie de la muestra escaneada, empleando la herramienta láser Polhemus FastScann. Finalmente, del cociente entre masa y volumen se obtiene la densidad de la muestra.

La validación del método se ha llevado a cabo empleando muestras de serrines de granito con distintos contenidos en agua, compactados en base al ensayo próctor normal haciendo uso de la Norma UNE-EN 103500-1994. Los cilindros de suelo con dimensiones de volumen próctor generados durante los ensayos, son empleados para la extracción y corte de muestras de menor tamaño por un lado, y para la determinación del contenido en agua de las mismas, por otro. Con ello se consiguen muestras de suelo con propiedades físicas homogéneas, susceptibles de ser pesadas y escaneadas a fin de obtener un valor de densidad. Este valor puede quedar expresado como densidad natural o densidad seca, en tanto que se conoce su contenido en agua (ver Figura A .1).

De modo general, los resultados muestran una fuerte correlación entre ambos métodos (i.e. método próctor y método de escáner láser), cuando la humedad del material se sitúa en el rango 20-32% en peso. Mientras que el límite inferior corresponde a un valor fijado desde la observación experimental para el cual el material se comporta de modo coherente, el límite superior queda establecido por el límite plástico del material, en tanto que condiciona el comportamiento mecánico de la porción de suelo considerada.

Las determinaciones se llevaron a cabo sobre dos tipos de serrines de granito: con granalla de acero y sin granalla. La presencia de granalla, repartida de forma no uniforme en el seno del material, provoca cierta desviación de los valores de densidad medida con el escáner láser respecto del valor próctor de referencia. Este fenómeno está vinculado con el incremento

diferencial de la masa en las muestras recortadas, cuyo volumen no es representativo de la muestra próctor de procedencia. Por su parte, los serrines sin granalla, menos sensibles al tamaño de muestra considerado, presentan diferencias relativas inferiores al 2% respecto de la densidad próctor de la muestra de procedencia. A tenor de los resultados, se puede concluir que el método propuesto para medida de densidades en suelos de grano fino es aceptable en un rango de humedades específico de cada suelo, determinado por su coherencia y su límite plástico.

Anexo I.B CALIBRACIÓN DE LA RESPUESTA ELÉCTRICA DE LOS SERRINES DE GRANITO

1 INTRODUCCIÓN

La conductividad eléctrica en suelos o rocas es una propiedad relacionada con la composición, la estructura y el contenido y características del agua que presenta el medio. Esta técnica representa un método geofísico no intrusivo de gran interés en prospecciones para el reconocimiento de distribuciones litológicas o determinación de las propiedades físicas del subsuelo.

La medida de la conductividad eléctrica puede realizarse mediante el método de corriente directa o mediante polarización inducida (Sumner, 1976; Seidel y Lange, 2007). En ambos casos, se introduce una corriente en el medio a través de unos electrodos transmisores y se recibe la señal en otros (receptores). La diferencia de potencial registrada entre transmisor y receptor, es función de la distancia entre electrodos y las propiedades físicas del medio atravesado.

La polarización inducida (IP) expresa en qué grado el medio es capaz de almacenar una carga eléctrica. La conductividad eléctrica del medio se determina a partir del tiempo de relajación transcurrido desde la interrupción de una excitación eléctrica inducida en el medio. En función del tipo de corriente aplicada, se distingue entre "IP en el dominio de tiempo" (corriente directa) y "IP en el dominio de frecuencia" (corriente alterna), también conocida como "resistividad compleja". Con este término se indica que, en sentido matemático, la resistividad es un parámetro complejo con una parte real y otra imaginaria.

Profundizando en el principio físico de esta propiedad eléctrica, se observa que la IP es un fenómeno íntimamente ligado a la presencia de minerales conductores y a las propiedades fisicoquímicas de las soluciones acuosas del medio. En ambos casos se produce una orientación de los iones presentes en el medio en sentido opuesto al electrodo de la misma carga que genera la corriente. Una vez se establece el flujo iónico, la tortuosidad del medio acuoso, la obstrucción de granos metálicos, la acumulación de iones en solución en torno a núcleos de roca con carga contraria, etc., inducen la generación de barreras polarizadas con cargas opuestas. Por lo tanto, las propiedades físicas del material (p.ej. fábrica, contenido en agua, porosidad, etc.), su composición y las características fisicoquímicas de la solución acuosa que alberga, condicionan la respuesta eléctrica del medio.

De lo analizado se deduce que, entre los aspectos condicionantes de la respuesta eléctrica de un medio, los parámetros de mayor relevancia son: la porosidad, el contenido en agua y las propiedades fisicoquímicas de la fase acuosa. Por ello, el uso del método eléctrico como

técnica de análisis requiere de un proceso de calibración que permita establecer la relación entre estos parámetros, para cada tipo de suelo.

En el marco del presente trabajo de investigación, fue necesario calibrar la respuesta eléctrica de los serrines de granito como paso previo al empleo de la técnica eléctrica en ensayos de laboratorio para el análisis hidrológico del material. Con este objetivo, en colaboración con el BGR de Berlín, se desarrolló un nuevo método de calibración de la respuesta eléctrica de suelos mediante curvas experimentales humedad-conductividad eléctrica haciendo uso del ensayo próctor normal (UNE-EN 103500-1994), en lo referente a la preparación de muestras. La instrumentación y metodología empleada, así como los resultados obtenidos, se analizan en los siguientes apartados, a fin de evaluar la aplicabilidad del método presentado.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Tal y como se ha mencionado, propiedades físicas como la porosidad o el contenido en agua de un suelo condicionan la respuesta eléctrica del mismo. La preparación de muestras que presenten tales propiedades de forma homogénea, se lleva a cabo mediante una campaña de muestras compactadas bajo condiciones próctor normal, elaboradas con serrines de granito a diversos contenidos de agua. El rango de humedades abarcado comprende desde el estado deshidratado hasta la capacidad de campo del material.

La metodología empleada consiste en trasladar la muestra cilíndrica de suelo fabricada en cada ensayo próctor, a un recipiente de metacrilato de dimensiones análogas a las del molde próctor normalizado (UNE-EN 103500-1994). Este recipiente está diseñado para alojar la muestra, confinarla superior e inferiormente, y transportarla preservando sus propiedades físicas. En la zona central del cilindro de metacrilato, se dispusieron 4 aperturas de forma lineal en la dirección de máxima elongación del molde, las cuales permiten la inserción de electrodos para medir la respuesta eléctrica de la muestra.

2.1 HERRAMIENTA SIPLAB

El equipo empleado en la determinación de la conductividad eléctrica de las muestras de suelo fue SIPLab (Spectral Induced Polarization, Radic Research, Berlin). Se trata de un sistema diseñado para la medida, en el dominio de frecuencia compleja, de la resistividad en sedimentos y rocas. El instrumento está optimizado para realizar medidas multielectrónicas en laboratorio, las cuales pueden ser repetidas en diferentes intervalos de tiempo. El rango de frecuencia utilizado por el instrumento se encuentra comprendido entre 1 mHz y 12 kHz, con un voltaje de ± 10 V e intensidad ± 10 mA.

SIPLab fue programado para medir las muestras alojadas en un cilindro de metacrilato dotado de 4 electrodos, el cual presentaba un factor de configuración $K=0.101$. La configuración electrónica adoptada fue la Wenner (Seidel y Lange, 2007).

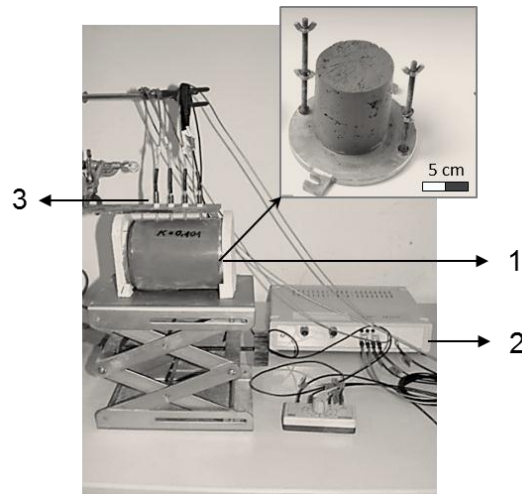


Figura A .10. Ensayo de calibración de la respuesta eléctrica de serrines de granito. [1] Molde de metacrilato para muestra próctor; [2] equipo SIPLab; [3] Electroodos.

2.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

Se elaboró un total de 28 muestras próctor siguiendo las especificaciones de la Norma UNE-EN 103500-1994, equivalente a la ASTM-D698. Para ello se emplearon mezclas de serrín de granito y agua, en las que el contenido del líquido fue incrementándose de modo sucesivo. Tras ser pesadas, aun dentro del molde próctor (a fin de conocer su densidad natural), se transfirieron al recipiente de metacrilato, donde se confinaron superior e inferiormente para inmovilizar la muestra y preservar sus propiedades físicas. A través de las aberturas situadas en la pared lateral del recipiente, se insertaron los electrodos y se determinó el valor de la resistividad eléctrica del material, de acuerdo con la configuración programada en SIPLab, seleccionando los datos referentes a la frecuencia 11.72 Hz.

Una vez finalizada la medida de resistividades, la muestra fue extraída del recipiente y dividida en dos partes. Una porción se destinó al secado (determinación del contenido en agua del material, UNE-EN 103300-1993), mientras que la otra fue empleada para obtener el agua intersticial mediante extractores Rhizon. Estas muestras de agua sirvieron para medir la conductividad eléctrica del agua de poro mediante conductímetro de laboratorio. A partir de los valores de densidad y contenido en agua, es posible evaluar los parámetros hidrológicos fundamentales de los serrines de granito, empleando para ello las relaciones presentadas en el esquema de la Figura A .1.

Las medidas de resistividad eléctrica, obtenidas con SIPLab para la frecuencia 11.72 Hz, y los parámetros hidráulicos de las muestras, fueron complementados con el valor de la conductividad eléctrica del agua intersticial determinada paralelamente a partir de las soluciones extraídas en cada una de las muestras. Estos tres parámetros han sido ampliamente estudiados en busca de una relación empírica que explique su variación acoplada (Archie, 1942; Rhoades *et al.*, 1976; Nadler y Frenkel, 1980; Rhoades *et al.*, 1989; Vogeler *et al.*, 1996; Amente *et al.*, 2000; Muñoz-Carpena *et al.*, 2001).

2.3 APROXIMACIONES EMPÍRICAS

La ley de Archie (Archie, 1942) establece el punto de partida de los fundamentos que rigen el comportamiento eléctrico de rocas y suelos. La demostración empírica de que la conductividad eléctrica (σ_b) en este tipo de materiales es función de la porosidad (ϕ), la conductividad eléctrica del agua de poro (σ_w) y el grado de saturación de la muestra considerada (S_w), permite establecer modelos de conductividad eléctrica en relación con la distribución del tamaño de grano y el contenido en agua, para conductividades eléctricas del agua fijas. La expresión matemática de la ley de Archie (1942) es la siguiente:

$$\sigma_b = \frac{\phi^m}{a} \sigma_w (S_w)^n \quad \text{e. A .3.}$$

La fórmula está compuesta de las variables ya mencionadas y de una serie de parámetros de ajuste, siendo a un factor de tortuosidad que corrige las variaciones en el grado de compactación, la estructura de poro y el tamaño de grano; m , el llamado coeficiente de cementación entre granos, propio de cada suelo; y n , el coeficiente de saturación.

En el transcurso de las décadas posteriores a la publicación de la ley de Archie, fue probada la influencia de la salinidad en el valor de la conductividad eléctrica (Rhoades *et al.*, 1976; Nadler y Frenkel, 1980; Rhoades y Oester, 1986; Rhoades *et al.*, 1989). Una expresión presentada por Rhoades *et al.* (1976) establece una relación entre σ_b y σ_w , que presenta dependencia exclusiva de dos parámetros: el contenido volumétrico en agua del material (θ) y la conductividad eléctrica de las partículas sólidas (σ_s).

$$\sigma_b = \theta \tau \sigma_w + \sigma_s \quad \text{e. A .4.}$$

El término τ es un coeficiente de transmisión o tortuosidad, relacionado con la disposición geométrica de las partículas sólidas, que puede ser expresado como una función lineal de la humedad del suelo:

$$\tau = a\theta + b \quad \text{e. A .5.}$$

En la expresión e. A .5, a y b son parámetros de ajuste empírico.

Por su parte, σ_s representa la contribución de la fracción sólida en el valor de la conductividad eléctrica del medio, debido a los procesos de intercambio catiónico que se producen en la superficie de las partículas sólidas (Amente *et al.*, 2000). A pesar de que es un valor que se considera constante en un suelo, se ha demostrado que para soluciones de baja salinidad su valor se ve incrementado con el contenido en agua (Nadler y Frenkel, 1980; Rhoades *et al.*, 1989; Amente *et al.*, 2000).

Otro tipo de aproximaciones son las esencialmente experimentales, en las que se busca una aproximación directa entre las tres variables consideradas, a partir de unos parámetros ajustados de forma empírica ($a, b, c, d, etc.$) para el suelo en cuestión (Vogeler *et al.*, 1996):

$$\sigma_b = (c\theta - d)\sigma_w + (a\theta - b) \quad \text{e. A. 6.}$$

3 RESULTADOS

Comparando los valores de conductividad eléctrica obtenidos a partir de las muestras próctor y las humedades calculadas para cada una de ellas, puede comprobarse la relación directa que existe entre ambos parámetros (Figura A .11). La región ampliada en la zona inferior del gráfico muestra como la intercepción de los datos con el eje σ_b tiende a valores negativos. Teóricamente, cuando el material está deshidratado debería mostrar una cierta conductividad eléctrica debido al efecto de σ_s . Esta anomalía no tiene sentido físico, y es explicado como la tendencia de los suelos a comportarse como no conductores por debajo de un contenido en agua crítico (Amente *et al.*, 2000). Desde un punto de vista hidrodinámico, contenidos de agua críticos son aquellos inferiores a la humedad residual del suelo (Mualem, 1976), para la cual el agua no es fase móvil.

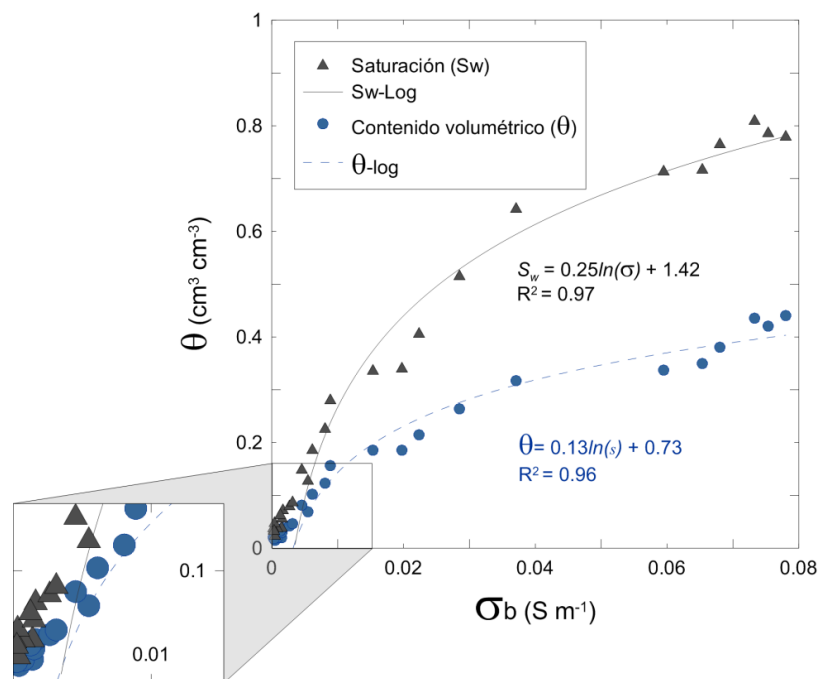


Figura A .11. Resultados de muestras próctor. Relación entre conductividad eléctrica y la humedad, expresada en términos de contenido volumétrico de agua (θ) y grado de saturación (S_w). Ajustes logarítmicos ($\theta - \sigma_b$; $S_w - \sigma_b$) y magnificación de la región del origen de coordenadas.

En la región de la Figura A .11 correspondiente al dominio de humedades altas, se observa que el máximo grado de saturación alcanzado se sitúa alrededor de 0.8. Este límite queda fijado

por la capacidad de campo del material, que expresa la cantidad máxima de agua retenible por el mismo. En este sentido, Rhoades y Oester (1989) puntualiza que la determinación de σ_w a partir de σ_b es posible hasta humedades cercanas a la capacidad de campo del material.

Bajo estas consideraciones, tiene sentido calibrar la respuesta eléctrica de un suelo para contenidos en agua comprendidos entre la humedad residual del mismo y su capacidad de campo. En el caso de los serrines de granito, se estimó una humedad residual de $0.09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ en procesos de humectación (Vázquez, 2005), mientras que como valor de la capacidad de campo se puede aceptar, de forma aproximativa, el límite plástico (Campbell *et al.*, 1980), que en el caso particular de los serrines se sitúa alrededor del 32% (Barrientos, 2007). Por lo tanto, se realizó una primera aproximación logarítmica con los datos referentes a humedades superiores a la residual, obteniéndose buenos ajustes de σ_b respecto del contenido volumétrico y grado de saturación. Este ajuste permite fijar σ_s en $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ S m}^{-1}$, para el corte de la curva con el eje de abscisas ($\theta = 0$).

Los datos correspondientes a las determinaciones de σ_w en el agua intersticial de los serrines, obtenida mediante extractores Rhizon hincados en las muestras próctor, quedaron limitados a aquellas que por su alta humedad presentaban facilidad para el drenaje. El tipo de extractor así como el agente succionador empleado (jeringas de 10 cm^3), permiten recolectar el agua retenida en el suelo para succiones superiores a -41 kPa (Cabrera, 1998) que, en el caso de los serrines de granito, se traduce en un contenido volumétrico en agua mínimo de $\sim 0.3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

La escasez de datos referentes a σ_w supone una restricción en el proceso de cálculo, en tanto que debe asumirse un rango de valores en el que cabe esperar se sitúe la σ_w de las muestras en las que no fue posible su determinación experimental. Este rango comprende desde la σ_w del agua de hidratación (0.08 S m^{-1}), hasta el valor máximo determinado para el agua de poro (0.29 S m^{-1}). Con los datos obtenidos hemos realizado los ajustes correspondientes a los modelos de Archie, Rhoades y Vogeler (ecuaciones e. A .3, e. A .4 y e. A .6, respectivamente). Los parámetros ajustados en cada uno de los modelos considerados para los serrines de granito se presentan en la Tabla A .2.

Tabla A .2. Aproximaciones empíricas de conductividad eléctrica en suelos en función de la humedad y la conductividad eléctrica del agua. Parámetros ajustados para los serrines de granito.

Modelo	Referencia	Ecuación	a	b	c	d	m	n	σ_s
Archie	Archie (1949)	$\sigma_b = \frac{\phi^m}{a} \sigma_w (S_w)^n$	1.00	--	--	--	1.36	1.53	--
Rhoades	Rhoades <i>et al.</i> (1976)	$\sigma_b = \theta(a\theta + b)\sigma_w + \sigma_s$	1.61	0.05	--	--	--	--	$3 \cdot 10^{-3}$
Vogeler	Vogeler <i>et al.</i> (1996)	$\sigma_b = (c\theta - d)\sigma_w + (a\theta - b)$	0.26	0.15	-0.56	-0.65	--	--	--

* σ_s , conductividad eléctrica asociada a las partículas sólidas (S m^{-1}); a , b , c y d , parámetros de ajuste empírico; m , parámetro de cementación; n , parámetro de ajuste de saturación.

4 RESUMEN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN

El método de calibración de respuesta eléctrica de suelos llevado a cabo con SIPLab a partir de muestras próctor, ha permitido aproximar los parámetros de diversos ajustes experimentales que relacionan la conductividad eléctrica y la humedad del suelo, para el caso particular de los serrines de granito.

El valor de la conductividad eléctrica del material asociado a las partículas sólidas se ha obtenido a partir de un ajuste logarítmico inicial con los datos de conductividad eléctrica del suelo y su humedad correspondiente, estimándose en $3 \cdot 10^{-3} \text{ S m}^{-1}$. Este valor correspondería a la conductividad eléctrica de los serrines de granito en estado deshidratado.

El valor de la conductividad eléctrica del agua intersticial se ha podido determinar únicamente en muestras que presentaban alta humedad, lo cual ha supuesto una restricción en la estimación de los parámetros de ajuste. Aprovechando los datos existentes, se asume un rango de conductividades eléctricas de agua para las muestras en las cuales no fue posible su determinación experimental, que abarca desde el valor mínimo (agua de hidratación) y el máximo medido en el agua intersticial. Con ello, la conductividad eléctrica del agua se convierte en un parámetro más del ajuste, acotado por los límites del rango considerado.

Para poder usarlos, cada una de las aproximaciones requiere del conocimiento de determinados parámetros físicos del suelo. La aproximación llevada a cabo a partir de la expresión de Archie (1942), precisa de un conocimiento detallado de las propiedades físicas del suelo. Rhoades *et al.* (1976) reduce este problema mediante un modelo más simple, que asume una tortuosidad dependiente de forma lineal con la humedad. La aproximación de Vogeler *et al.* (1996), de carácter empírico y lineal para una conductividad eléctrica del agua constante, reduce su fiabilidad a las condiciones del muestreo adoptadas durante el proceso de calibración.

Por ello, cabe esperar que con un buen conocimiento de las propiedades físicas de los serrines de granito, la aproximación de Archie (1942) refleje mejor la distribución del agua en el material y su conductividad eléctrica. Cuando la variación interna en las propiedades del material sea pequeña y para un rango de humedad que abarque hasta la capacidad de campo, la aproximación de Rhoades *et al.* (1976) puede ser igualmente efectiva. Sin embargo, de la aproximación empírica se esperan obtener los peores resultados en los contextos de aplicación donde las condiciones de compactación de los serrines sean diferentes a las que se alcanzarían mediante ensayos próctor, para un contenido en agua similar.

Anexo I.C CALIBRACIÓN DE SONDAS DE CAPACITANCIA PARA LOS SERRINES DE GRANITO

1 INTRODUCCIÓN

La constante dieléctrica de un material es una propiedad relacionada con las características físicas del mismo. Desde la década de los 70' del siglo pasado, esta propiedad ha sido empleada como indicador indirecto de la humedad del suelo. Inicialmente, su uso estaba vinculado a la detección de anomalías en las líneas de transmisión eléctrica y la respuesta del campo eléctrico propio de los constituyentes del suelo.

La influencia de la humedad en las propiedades eléctricas del suelo propició el avance de esta técnica en el campo de la edafología y la mecánica de suelos. En la práctica, esta medida puede llevarse a cabo en suelos gracias al fuerte contraste (aproximadamente de un orden de magnitud) entre la constante dieléctrica del agua y la de los minerales que constituyen comúnmente la matriz de los suelos.

Los sensores dieléctricos de humedad comerciales son, normalmente, de dos tipos: TDR y de capacitancia. Los primeros miden la constante dieléctrica del medio determinando el tiempo que tarda un pulso electromagnético en atravesar una guía metálica enterrada en el medio; los segundos, hacen lo propio a partir de la diferencia de voltajes registrada en el sensor hincado en el suelo. A pesar de las diferencias entre sus principios físicos, la constante dieléctrica del medio puede ser determinada a partir de ambos métodos (Campbell *et al.*, 2005).

A lo largo de las últimas dos décadas, numerosos autores han demostrado, la influencia de la conductividad eléctrica del medio y la salinidad del agua en la señal registrada (Muñoz-Carpena *et al.*, 2001; Regalado *et al.*, 2003; Ritter *et al.*, 2003; Robinson *et al.*, 2003; Kelleners *et al.*, 2004a; Regalado *et al.*, 2005; Ritter *et al.*, 2005; Ritter y Regalado, 2007).

La conductividad eléctrica de un suelo es, a su vez, función de las propiedades físicas del mismo (porosidad, granulometría o la distribución de huecos). Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración de la señal particular de cada tipo de suelo.

En el presente estudio hemos llevado a cabo la calibración de una sonda de capacitancia (ECHO EC-5), en serrines de granito. Para ello hemos empleado muestras de suelo con propiedades físicas homogéneas y conocidas, elaboradas a partir de ensayos próctor normal (UNE-EN 103500-1994). En el seno de las muestras se insertaron los sensores y se llevaron a cabo una comparación de la señal registrada respecto al valor teórico próctor.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

El empleo del ensayo próctor para elaboración de muestras posee, en este caso, una doble importancia debido a la morfología y dimensiones del sensor. Por un lado, permite obtener muestras de suelo con propiedades físicas homogéneas y conocidas, sobre las que referenciar la señal registrada. Por otra parte, asegura que no se produzcan interferencias de objetos ajenos a la fábrica original del material durante las mediciones, ya que la elaboración de cada muestra va precedida de un proceso de preparación del material (molienda y tamizado).

2.1 SONDA ECHO EC-5

La sonda ECHO EC-5 (*Decagon Devices, Inc.*) para la medida de humedades en suelos posee un sensor de dos agujas acopladas a un circuito electrónico, que mide el contenido volumétrico en agua del material situado entre ambas prolongaciones (Figura A .12). El tiempo de medida es de 0.01 s, con una resolución de $0.001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en suelos minerales.

La sonda posee una precisión de, al menos, $0.003 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en suelos cuyas aguas intersticiales presentan una conductividad eléctrica inferior a 0.8 S m^{-1} .



Figura A .12. Sonda de capacitancia ECHO modelo EC-5 (*Decagon Devices, Inc.*). [1] Transmisor de señal inalámbrico; [2] Sensor de humedad.

El sensor [1] está conectado por medio de un cable, a un transmisor inalámbrico de corto alcance [2] que permite recoger la señal desde un receptor acoplado a PC hasta una distancia máxima de 500 m.

La inserción del sensor se puede realizar en cualquier dirección, sin que esto influya en la calidad de la medida. La escasa distancia existente entre las dos agujas (dominio de medida), exige un minucioso examen de la zona de inserción ya que la contaminación con pequeños objetos ajenos al material medido, pueden distorsionar la señal recogida cuando estos se sitúan en el dominio de medida.

2.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

Haciendo uso de la Norma UNE-EN 103500-1994, se ejecutó un total de 34 ensayos próctor normal empleando serrín de granito mezclado con agua en proporción variable. A partir del peso de la muestra se determinó su densidad aparente (relación entre la masa compactada y el volumen del molde próctor que ocupa).

De cada una de las muestras próctor se extrajo una porción para la determinación de la humedad mediante secado en estufa, siguiendo las indicaciones de la Norma UNE-EN 103300-1993. Del conocimiento de la humedad y la densidad, se puede obtener el contenido volumétrico en agua de cada muestra, tal y como se recoge en la Figura A .1.

Un sensor EC-5 fue insertado dentro de cada masa compactada, llevándose a cabo un registro en continuo de la humedad de la muestra hasta alcanzarse un valor estable. El hecho de que durante las primeras medidas el valor fluctúe, se interpreta como el resultado de la inserción del sensor en el material, que puede provocar leves compresiones tangenciales en la zona muestreada.

3 RESULTADOS

Los valores determinados teóricamente a partir de las muestras próctor normal, fueron comparados con los obtenidos por el sensor EC-5 (Figura A .13).

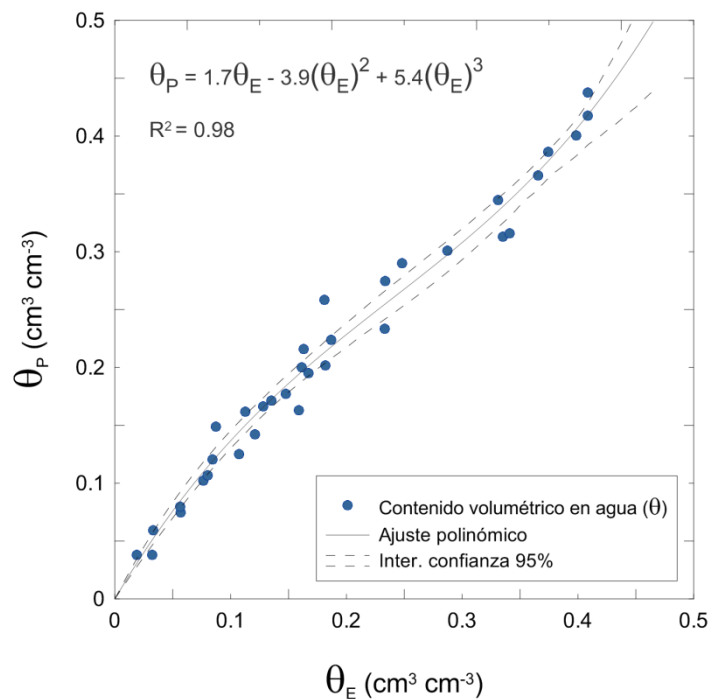


Figura A .13. Calibración de la sonda ECHO EC-5 en serrines de granito. Contenido volumétrico en agua de muestras próctor normal (θ_P) respecto del valor registrado con el sensor EC-5 (θ_E) en cada muestra.

La medida de la humedad en el material completamente deshidratado resulta muy delicada ya que, durante el vertido de material seco en el molde próctor, éste entra en contacto con el medio ambiente y adquiere cierta humedad. Por lo tanto, suponiendo que en un estado de deshidratación total de los serrines de granito el contenido volumétrico en agua registrado por el sensor y el teórico coinciden en el origen de coordenadas, la mejor aproximación de los datos experimentales a valores reales obedece a un ajuste polinómico de grado 3.

El ajuste polinómico llevado a cabo es próximo a una recta, lo que indica una buena respuesta de la sonda en serrines de granito. Sin embargo, a partir de la función polinómica (ilustrada en la Figura A .12) se comprueba la existencia de una inflexión en la curva para contenidos en agua cercanos a $0.3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, fenómeno que puede indicar un ligero aumento del error relativo de la sonda bajo condiciones de humedad elevada.

4 RESUMEN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN

Se ha llevado a cabo un proceso de calibración de una sonda de capacitancia (ECHO EC-5) en serrines de granito, empleando el ensayo próctor normal como método de elaboración de muestras de referencia.

Los resultados muestran que el mejor ajuste entre la señal registrada por la sonda y el valor próctor teórico para el contenido volumétrico en agua, se consigue mediante una función polinómica de grado 3. Tal función se fuerza a pasar por el origen de coordenadas en tanto que se considera que cuando el material se encuentra totalmente deshidratado, la sonda no debería registrar humedad alguna. Sin embargo, la constante dieléctrica depende de la conductividad eléctrica del medio, con lo que es posible que en dicho estado de deshidratación la sonda registrase señal debido a la conductividad eléctrica de las partículas sólidas (Rhoades *et al.*, 1976; Kelleners *et al.*, 2004a).

El ajuste polinómico muestra que, en lo referente a los serrines de granito, a partir de un contenido volumétrico en agua superior a $0.3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, la precisión de la sonda disminuye. Esto implica que las variaciones en la humedad del material son más difíciles de detectar cuanto más saturado se encuentre el mismo.

La función de ajuste final de la sonda de captancia ECHO EC-5 en serrines de granito, en la que θ_P refleja el valor teórico del contenido volumétrico en agua y θ_E el registrado por la sonda, es la siguiente:

$$\theta_P = 1.7\theta_E - 3.9(\theta_E)^2 + 5.4(\theta_E)^3 \quad \text{e. A .7.}$$



FOTOS DE LOS DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES

Anexo II.A Columna para Análisis Hidrogeoquímico de Materiales Granulares	201
Anexo II.B Columna con Sensores de Humedad y Succión	203
Anexo II.C Tanque de Electrodo	205
Anexo II.D Dispositivo ES-2345472-B1	207

Anexo II.A COLUMNA PARA ANÁLISIS HIDROGEOQUÍMICO DE MATERIALES GRANULARES

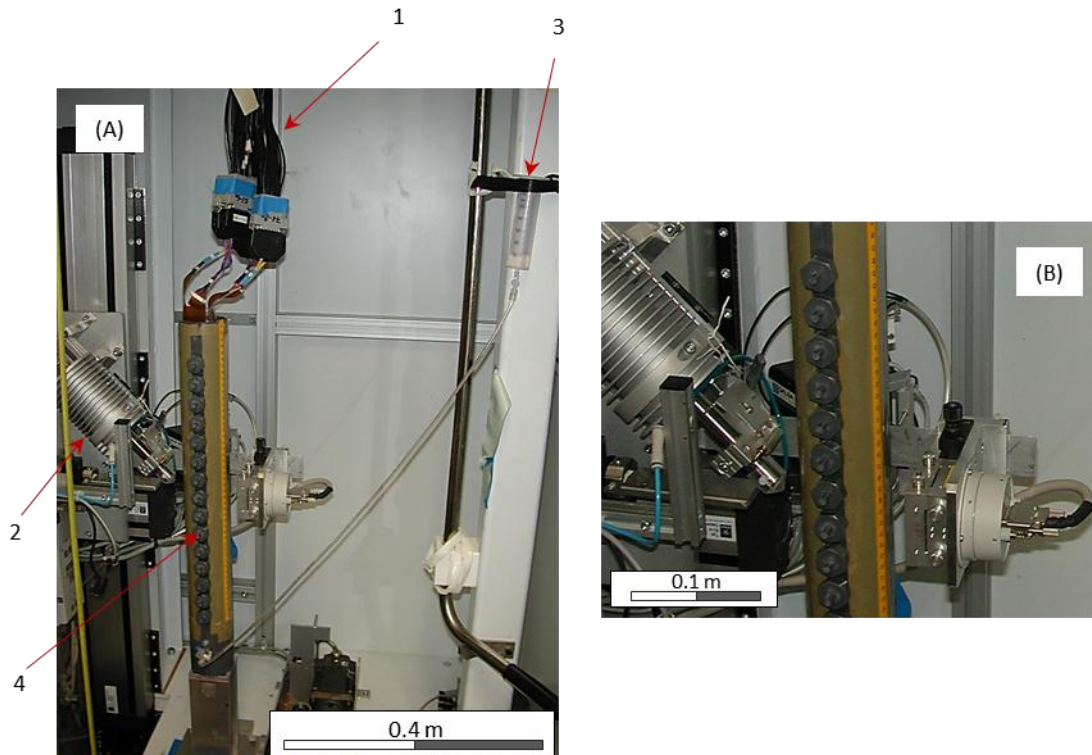


Figura A .14. (A) Columna para el análisis hidrogeoquímico de materiales granulares (BGR, Hanover). [1] Conectores para SIPLab; [2] Geoescaner; [3] Depósito para aportar agua a la columna; [4] Puertos para extractores de soluciones acuosas en suelos (Rhizon). (B) Geoescaner en detalle.

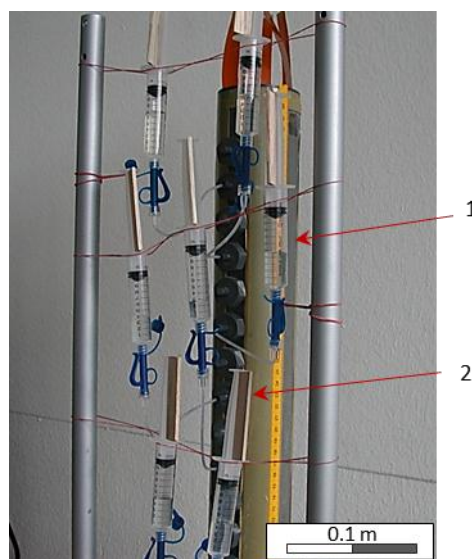


Figura A .15. Proceso de deshidratación forzada con extractores Rhizon. [1] Jeringas empleadas en la extracción; [2] Maderas de anclaje para ejercer succión.

Anexo II.B COLUMNA CON SENSORES DE HUMEDAD Y SUCCIÓN

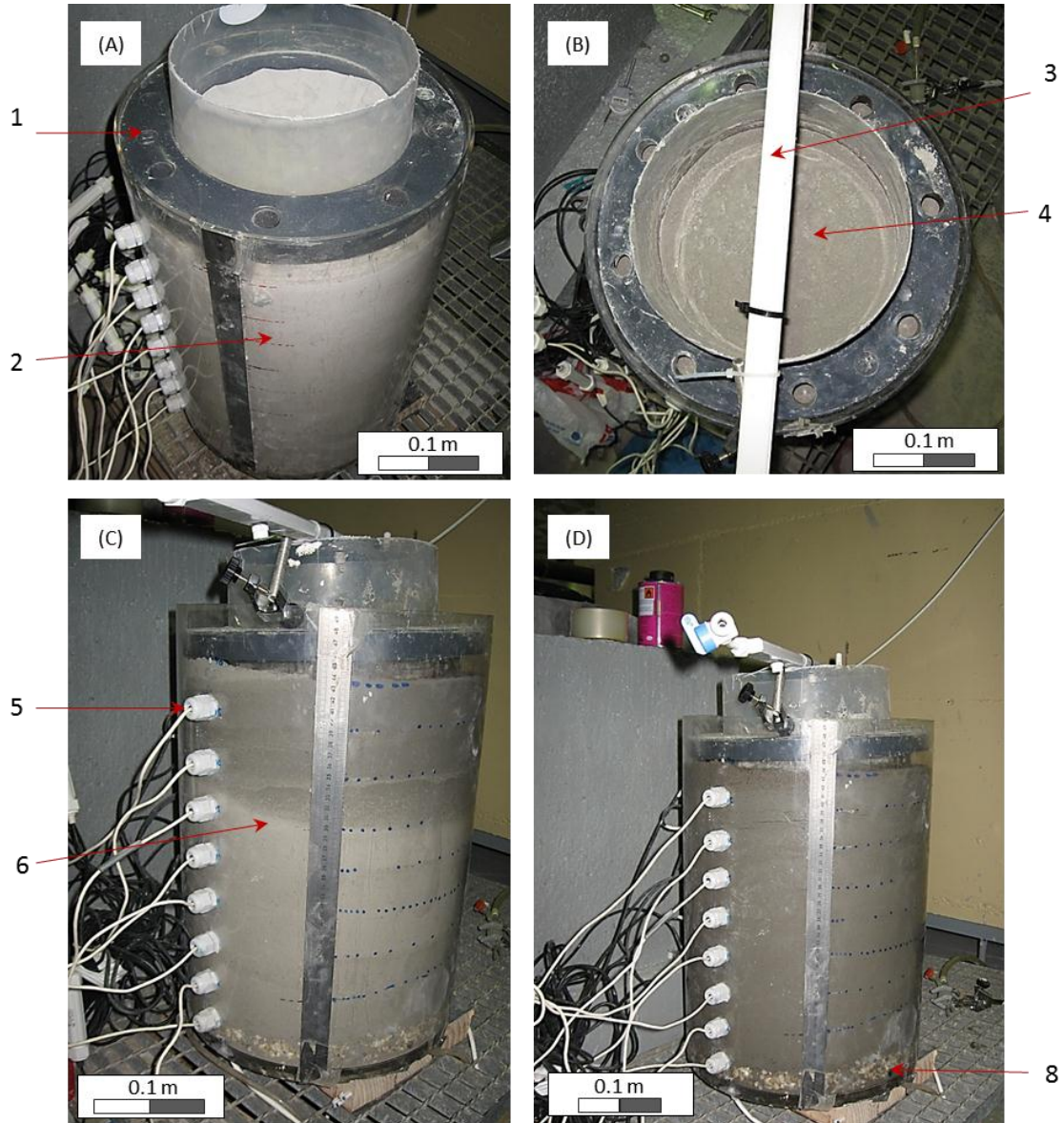


Figura A .16. Cilindro de metacrilato. (A) Cilindro con serrines de granito en condiciones iniciales [2], con zona superior acotada para el riego mediante anillo separador [1]. (B) Vista en planta del experimento. Tubo para aporte de agua por nebulización [3-7]; [4] Superficie la columna tras hidratación [4]. (C) Estado de la columna durante el avance del frente de hidratación [6], detectado por los sensores de humedad y succión insertos en el material [5]. (D) Columna en estado avanzado de hidratación; [8] capa de grava drenante.

Anexo II.C TANQUE DE ELECTRODOS

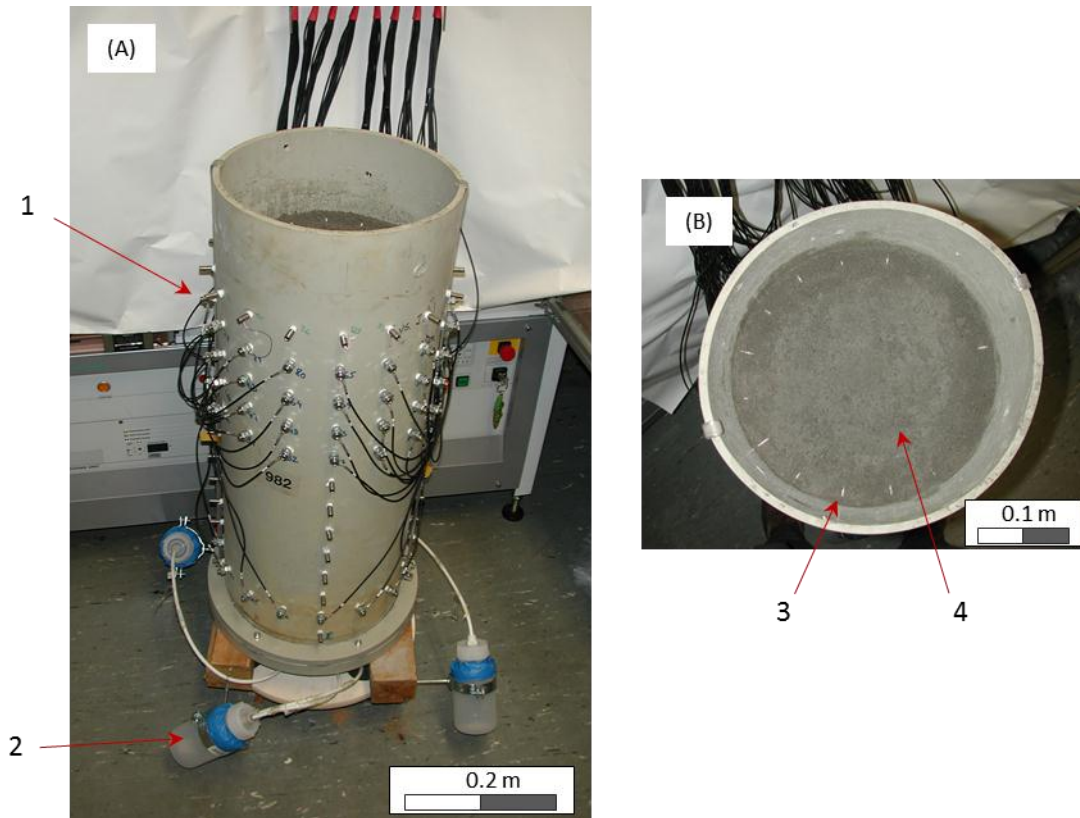


Figura A .17. Tanque de electrodos. (A) Disposición de los electrodos [1] en la columna; [2] Depósitos para recogida de lixiviados. (B) Vista en planta de la columna en la que se muestra superficialmente la profundidad de la hincia perimetral de los electrodos en los serrines de granito [4].

Anexo II.D DISPOSITIVO ES-2345472-B1

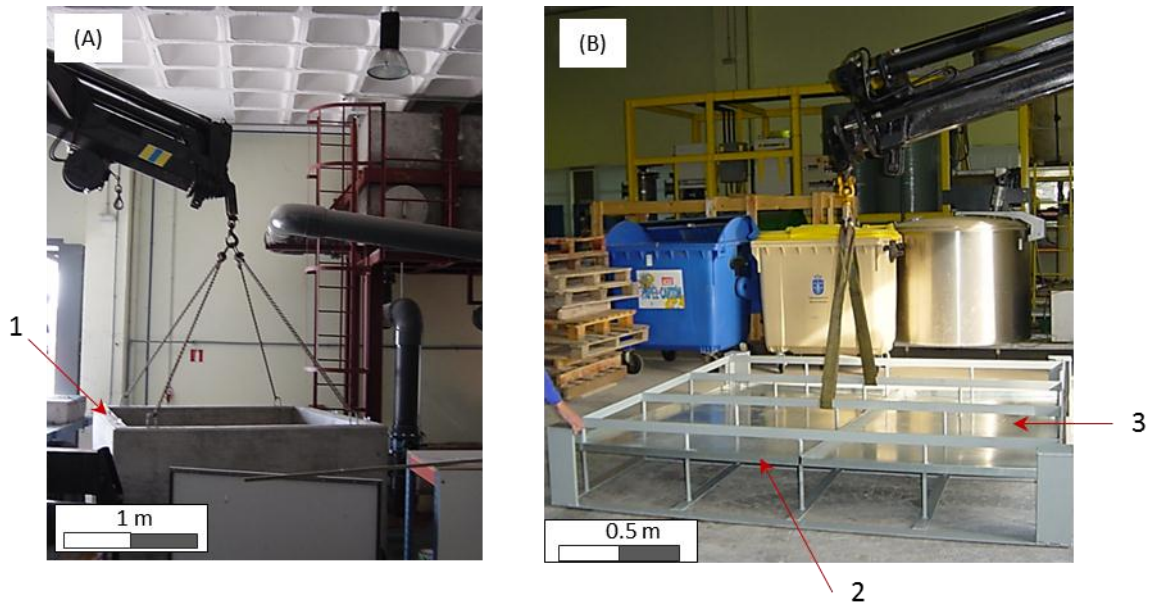


Figura A .18. Ubicación del recinto experimental en el laboratorio de hidráulica del CITEEC. Prisma de hormigón [1] que se apoya en un soporte metálico [2] dotado de una bandeja para recogida de lixiviados [3].

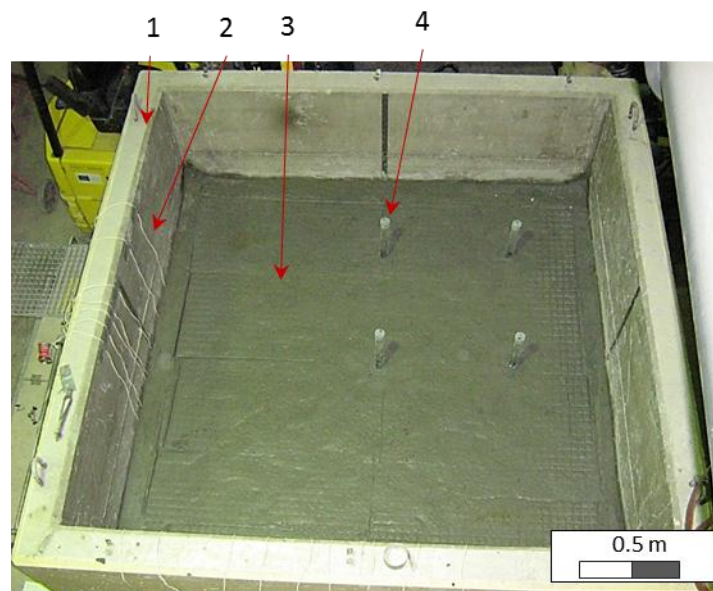


Figura A .19. Ejemplo de montaje experimental. En el recinto de confinamiento de hormigón [1] se vierten y compacta en tongadas el material [3]. Durante el proceso de llenado, son hubicados diversos sensores para la medida de humedad y succión en suelos [2]. En este ejemplo se emplearon, además, sondas de tubo TDR [4], cuyos tubos de acceso son hincados en el material tras finalizar el proceso de compactación.

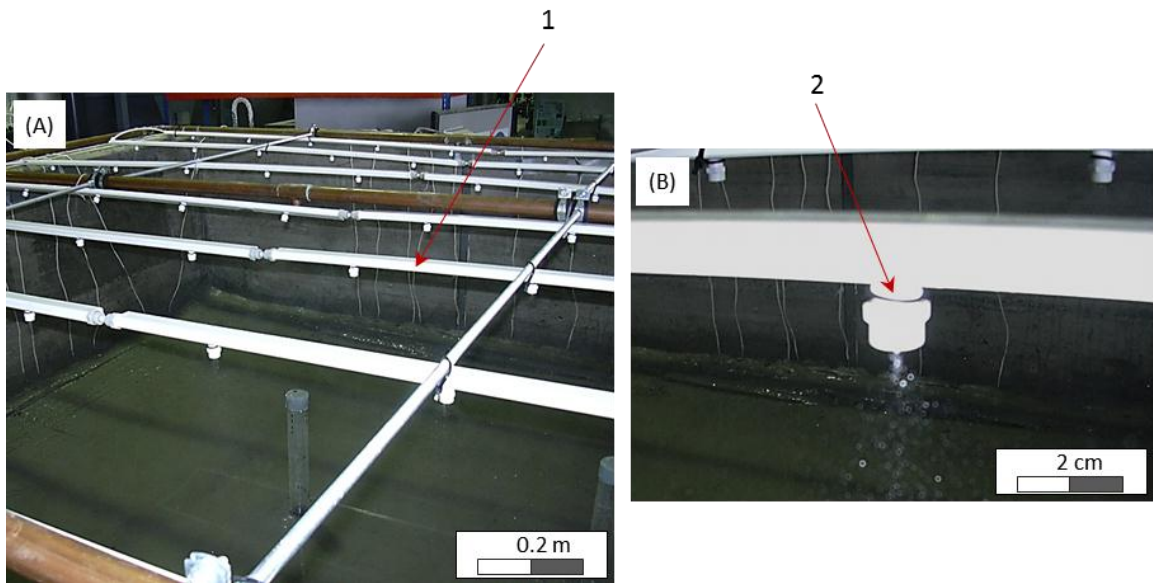
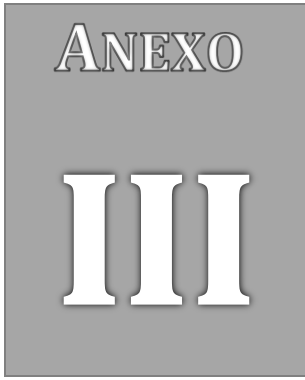


Figura A .20. Sistema de riego por nebulización. (A) Enjambre de tubos [1] y boquillas nebulizadoras [2] sobre la superficie del modelo experimental. (B) Boquilla nebulizadora en funcionamiento.



CONTRIBUCIONES ACADÉMICAS DE LA TESIS

Anexo III.A Publicaciones	213
Anexo III.B Congresos	213
Anexo III.C Patentes	213

Anexo III.A PUBLICACIONES

Vázquez, A., Juncosa, R., Barrientos, V., Falcón, I. y Delgado, J. (2007). Hydrodynamic and reactive transport modeling of the behavior of compacted granite saw dust for landfill liners & covers. *Water-Rock Interaction*, 1, 653-657.

Vázquez, A., Fernández-Bogo, S., Delgado, J., Falcón, I., Barrientos, V., Juncosa, R., Missana, T., Alonso, U. y Martín, P. L. (2008). Determinación del punto Isoeléctrico de residuos de grano fino y su potencial uso en la neutralización de aguas ácidas. *MACLA*, 9, 255-256.

Barrientos, V., Delgado, J., Navarro, V., Juncosa, R., Falcón, I. y Vázquez, A. (2010). Characterization and geochemical-geotechnical properties of granite sawdust produced by the dimension stone industry of O Porrino (Pontevedra, Spain). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43, 141-155.

Anexo III.B CONGRESOS

Falcon, I., Vázquez, A., Barrientos, V., Juncosa, R. y Delgado, J. (2007). Aplicación de Residuos de Corte de Granito en Ingeniería Civil: Modelo de Barrera de Impermeabilización. En: *Congreso Internacional Retos Medioambientales en el Sector de la Piedra Natural*, Cáceres, 129-134.

Falcon, I., Sánchez-Tembleque, F., Juncosa, R. y Delgado, J. (2008). Development of a 3D scanner technique to measure bulk density of fine grained soils. En: *International Geological Congress*, Oslo, (Póster).

Falcón, I., Rammlmair, D., Delgado, J. y Juncosa, R. (2010). Study of hydrodynamic behavior, fluid conductivity and composition analysis in granite fines. En: *20th General Meeting of the International Mineralogical Association*, Budapest, 339-340.

Anexo III.C PATENTES

Juncosa, R., Delgado, J., Vázquez, A., Barrientos, V. y Falcón, I. (2011). Dispositivo para la simulación del comportamiento termo-hidro-mecánico de barreras de materiales finos, para la impermeabilización y sellado de vertederos. Patente de invención *ES 2345472 B1*, Universidade da Coruña, España.

REFERENCIAS

- Abdel Rahman, R. O. (2011). Preliminary evaluation of the technical feasibility of using different soils in waste disposal cover system. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 30, 19-28.
- Akin, S., Schembre, J. M., Bhat, S. K. y Kovscek, A. R. (2000). Spontaneous imbibition characteristics of diatomite. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 25, 149-165.
- Alakangas, L. y Öhlander, B. (2006). Formation and composition of cemented layers in low-sulphide mine tailings, Laver, northern Sweden. *Environmental Geology*, 50, 809-819.
- Amente, G., Baker, J. M. y Reece, C. F. (2000). Estimation of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1931-1939.
- Andraski, B. J. y Scanlon, B. R. (2002). Thermocouple psychrometry. En: *Methods of soil analysis*, Ed. SSSA, Inc., Madison, WI, 4, 609-642.
- APHA, AWW y WEF. (1992). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ed. Díaz de Santos, Madrid, 1715 pp.
- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 146, 54-62.
- ASTM-D698. (2007). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). *ASTM International*, 13 pp.
- ASTM-D1556. (2007). Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method. *ASTM International*, 7 pp.
- ASTM-D1557. (2009). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)). *ASTM International*, 10 pp.
- ASTM-D2167. (2008). Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method. *ASTM International*, 8 pp.
- ASTM-D2216. (2010). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *ASTM International*, 7 pp.
- ASTM-D6938. (2010). Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth). *ASTM International*, 11 pp.
- ASTM-E1441. (1992). Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging. En: *Annual Book of ASTM Standards, Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures.*, ASTM, Philadelphia, 690-713.

- Aubertin, M., Cifuentes, E., Apithy, S. A., Bussiere, B., Molson, J. y Chapuis, R. P. (2009). Analyses of water diversion along inclined covers with capillary barrier effects. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 1146-1164.
- Bachmat, Y. y Daniel, H. (2005). Ground water and aquifers. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 2, 153-168.
- Bardet, J. P. (1997). *Experimental Soil Mechanics*. Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 582.
- Barrera, M., Garnica, P. y Martínez, F. (2004). Influencia de la succión en los cambios volumétricos de un suelo compactado. En: *Publicación técnica, Instituto Mexicano del Transporte*, Sanfandila, Mexico, 239 pp.
- Barrientos, V. (2007). Caracterización geotécnica de los serrines de granito y algunas aplicaciones en ingeniería civil. *Tesis Doctoral inédita*, Universidade da Coruña, A Coruña, 187 pp.
- Barrientos, V., Delgado, J., Navarro, V., Juncosa, R., Falcón, I. y Vázquez, A. (2010). Characterization and geochemical-geotechnical properties of granite sawdust produced by the dimension stone industry of O Porrino (Pontevedra, Spain). *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43, 141-155.
- Barrientos, V., Juncosa, R., Vázquez, A., Delgado, J. y Navarro, V. (2004). Caracterización de las Propiedades Morfológicas, Físico-Químicas y Geotécnicas Básicas de los Serrines de Corte de Granito de O Porriño, Pontevedra. *8º Simposio nacional de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica "Geotecnia Ambiental y Mejora del Terreno"*. Valencia (España), 125-136.
- Baumhardt, R. L., Schwartz, R. C. y Daniel, H. (2004). Crust structural. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 1, 347-356.
- Bayer, A., Vogel, H. J. y Roth, K. (2004). Direct measurement of the soil water retention curve using X-ray absorption. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 2-7.
- Bresler, E. (1978). Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science*, 1, 3-17.
- Cabrera, R. I. (1998). Monitoring chemical properties of container growing media with small soil solution samplers. *Scientia Horticulturae*, 75, 113-119.
- Caffaratti, F., Franck, G. y Sonzogni, S. (2004). Interfase para la conexión de módulos de análisis de elementos finitos. *Mecánica Computacional*, 23, 3309-3320.
- Campbell, D. J., Stafford, J. V. y Blackwell, P. S. (1980). The plastic limit, as determined by the drop-cone test, in relation to the mechanical behaviour of soil. *Journal of Soil Science*, 31, 11-24.
- Campbell, G. S., Campbell, C. S. y Daniel, H. (2005). Water content and potential, measurement. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 4, 253-257.
- Campbell, M. C., Starrett, M. S., Fowler, J. D. y Klein, J. (1990). Slug tests and hydraulic conductivity. *Ground Water Management*, 4, 2-16.

- Carro, D. (2009). Desarrollo de un tratamiento de estabilización sobre los residuos de fuel del Prestige. Posibilidades de almacenamiento definitivo del residuo estabilizado y potencial uso como material de construcción. *Tesis Doctoral inédita*, Universidade da Coruña, A Coruña, 242 pp.
- Cedergren, H. R. (1967). Seepage, drainage, and flow nets. Ed. John Wiley and Sons Inc., New York, 50-61.
- Cooper, H. H., Jr., Bredehoeft, J. D. y Papadopoulos, I. S. (1967). Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. *Water Resources Research*, 3, 263-269.
- Coroneos, C., Hinsinger, P. y Gilkes, R. J. (1995). Granite powder as a source of potassium for plants: a glasshouse bioassay comparing two pasture species. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 45, 143-152.
- CUE. (1999). Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos. Consejo de las Comunidades Europeas, DOCE L-182, 16/7/1999.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983). Hidrología Subterránea vol. 2. 2ª Ed. Ed Omega, S. A., Barcelona, 1157pp.
- Chang, D. (2003). A one-parameter approximation for soil hydraulic functions. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2, 123-136.
- Chirlin, G. R. (1989). A Critique of the Hvorslev Method for Slug Test Analysis: The Fully Penetrating Well. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 9, 130-138.
- Choi, H., Nguyen, T. B. y Lee, C. (2008). Slug Test Analysis to Evaluate Permeability of Compressible Materials. *Ground Water*, 46, 647-652.
- Chorover, J. y Daniel, H. (2005). Zero-charge points. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 4, 367-373.
- Dannowski, G. y Yaramanci, U. (1999). Estimation of water content and porosity using combined radar and geoelectrical measurements. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4, 15.
- Delgado, J. y Juncosa, R. (2005). Estudio de los residuos de corte de granito ("serrines") en relación con sus características como residuo, su potencial contaminante y aplicaciones prácticas en ingeniería civil. *Revista Academia Galega de Ciencias*, 24, 73-258.
- Delgado, J., Vázquez, A., Juncosa, R. y Barrientos, V. (2006). Geochemical assessment of the contaminant potential of granite fines produced during sawing and related processes associated to the dimension stone industry. *Journal of Geochemical Exploration*, 88, 24-27.
- Di Bonito, M. (2005). Trace elements in soil pore water: a comparison of sampling methods. *Tesis Doctoral inédita*, University of Nottingham, Nottingham, 299 pp.
- Dickens, G., Koelling, M., Smith, D., Schnieders, L. y Scientists, I. E. (2007). Rhizon sampling of pore waters on scientific drilling expeditions: an example from the IODP Expedition 302, Arctic Coring Expedition (ACEX). *IODP Scientific Drilling*, 4, 22-25.

- Espinha Marques, J., Samper, J., Pisani, B., Alvares, D., Carvalho, J., Chaminé, H., Marques, J., Vieira, G., Mora, C. y Sodr e Borges, F. (2011). Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environmental Earth Sciences*, 62, 1219-1234.
- Ferr e, T. P. A., Warrick, A. W. y Daniel, H. (2005). Infiltration. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 2, 254-260.
- Fraser, J. y McBride, R. A. (2000). The utility of aggregate processing fines in the rehabilitation of dolomite quarries. *Land Degradation & Development*, 11, 1-17.
- Fredlund, D. G. y Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
- Friedman, S. P. y Seaton, N. A. (1998). Critical path analysis of the relationship between permeability and electrical conductivity of three dimensional pore networks. *Water Resources Research*, 34, 1703-1710.
- Gardner, W. R. y Daniel, H. (2005). Richards, Lorenzo A. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 4, 407-411.
- Glass, R. J. y Yarrington, L. (1996). Simulation of gravity fingering in porous media using a modified invasion percolation model. *Geoderma*, 70, 231-252.
- Gonz alez, E. P., D az-Pache, F. S.-T., Mosquera, L. P. y Agudo, J. P. (2007). Bidimensional measurement of an underwater sediment surface using a 3D-Scanner. *Optics & Laser Technology*, 39, 481-489.
- Green, R. E. y Corey, J. C. (1971). Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods. *Soil Science Society of America Journal*, 35, 3-8.
- G nther, T., R cker, C. y Spitzer, K. (2006). Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography - II. Inversion. *Geophysical Journal International*, 166, 506-517.
- Hamed, Y., Persson, M. y Berndtsson, R. (2003). Soil solution electrical conductivity measurements using different dielectric techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1071-1078.
- Heijs, A. W. J., de Lange, J., Schoute, J. F. T. y Bouma, J. (1995). Computed tomography as a tool for non-destructive analysis of flow patterns in macroporous clay soils. *Geoderma*, 64, 183-196.
- Hopmans, J. W., van Genuchten, M. y Daniel, H. (2005). Vadose zone, hydrologic processes. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 4, 209-216.
- Hvorslev, M. J. (1951). Time lag and soil permeability in ground water observations. *Bulletin No. 36, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.*, 50 pp.
- Hyder, Z. y Butler, J. J. (1995). Slug tests in unconfined formations: an assessment of the bouwer and rice technique. *Ground Water*, 33, 16-22.

- ICAR. (2000). An investigation of the status of by-product fines in the United States. International Center for Aggregate Research Report 101-1.
- Inoue, M., Imunek, J., Hopmans, J. W. y Clausnitzer, V. (1998). In situ estimation of soil hydraulic functions using a multistep soil-water extraction technique. *Water Resources Research*, 34, 1035-1050.
- Jason, K. S. y John, S. S. (2001). Effect of soil-particle size contrast on capillary barrier performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 885-888.
- Juncosa, R., Delgado, J., Vázquez, A., Barrientos, V. y Falcón, I. (2011). Dispositivo para la simulación del comportamiento termo-hidro-mecánico de barreras de materiales finos, para la impermeabilización y sellado de vertederos. Patente de invención ES 2345472 B1, Universidade da Coruña, España.
- Jung, W. K., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A. y Kremer, R. J. (2005). Relationship of apparent soil electrical conductivity to claypan soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 883-892.
- Kelleners, T. J., Robinson, D. A., Shouse, P. J., Ayars, J. E. y Skaggs, T. H. (2005). Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 67-76.
- Kelleners, T. J., Soppe, R. W. O., Ayars, J. E. y Skaggs, T. H. (2004a). Calibration of capacitance probe sensors in a saline silty clay soil. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 770-778.
- Kelleners, T. J., Soppe, R. W. O., Robinson, D. A., Schaap, M. G., Ayars, J. E. y Skaggs, T. H. (2004b). Calibration of capacitance probe sensors using electric circuit theory. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 430-439.
- Khire, M., V., Benson, C., H. y Bosscher, P., J. (2000). Capillary barriers: design variables and water balance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, 695-708.
- Kiberu, J. (2002). Induced polarization and resistivity measurements on a suite of near surface soil samples and their empirical relationship to selected measured engineering parameters. *Master of Science in Applied Geophysics*, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, 137 pp.
- Knutson, J. H. y Selker, J. S. (1996). Fiberglass wick sampler effects on measurements of solute transport in the vadose zone. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 701-707.
- Kretzschmar, R. y Daniel, H. (2005). Colloid-facilitated sorption and transport. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 1, 276-284.
- Lambot, S., Slob, E. C., Vanclooster, M. y Vereecken, H. (2006). Closed loop GPR data inversion for soil hydraulic and electric property determination. *Geophysical Research Letters*, 33, L21405, 5 pp.
- Leech, C., Lockington, D., Doug Hooton, R., Galloway, G., Cowin, G. y Dux, P. (2008). Validation of Mualem's conductivity model and prediction of saturated permeability from sorptivity. *ACI, Materials Journal*, 105, 44-51.

- Lima, O. A. L. y Niwas, S. (2000). Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements. *Journal of Hydrology*, 235, 12-26.
- Matko, V. (2003). Porosity determination by using frequency difference method. *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vail, CO, 871-876.
- McCallum, B., Fright, W., Nixon, M. y Price, N. (1996). A feasibility study of hand-held laser surface scanning. *Proceedings of Image and Vision Computing New Zeland*, 103, 1-8.
- McCallum, B., Nixon, M., Price, N. y Fright, W. (1998). Hand-held laser scanning practice. En: *Image & Vision Computing*, Ed. University of Auckland, New Zealand, 2, 17-22.
- McDonald, L. M., Evangelou, V. P., Chappell, M. A. y Daniel, H. (2005). Cation exchange. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 1, 180-188.
- Moret, D., Arrúe, J. L., López, M. V. y Gracia, R. (2006). A new TDR waveform analysis approach for soil moisture profiling using a single probe. *Journal of Hydrology*, 321, 163-172.
- Morrison, R. y Szecsody, J. (1985). Sleeve and casing lysimeters for soil pore water sampling. *Soil Science*, 139, 446-451.
- Morrison, R. D. y Lowery, B. (1990). Sampling radius of a porous cup sampler: experimental results. *Ground Water*, 28, 262-267.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- Muñoz-Carpena, R., Regalado, C. M., Alvarez-Benedí, J., Socorro, A. R. y Pérez, N. (2001). Determinación simultánea mediante TDR del transporte de agua y un soluto salino en el suelo. *Jornadas sobre Investigación en la Zona no Saturada del Suelo 5*, UPN, ETSIA, Pamplona, 83-89.
- Murray D. Fredlund, G. Ward Wilson y Fredlund, D. G. (1997). Indirect procedures to determine unsaturated soil property functions. *Proceedings of the 50th Canadian Geotechnical Conference*, Ottawa, 2-9.
- Musters, P. A. D. y Bouten, W. (2000). A method for identifying optimum strategies of measuring soil water contents for calibrating a root water uptake model. *Journal of Hydrology*, 227, 273-286.
- Nadler, A. y Frenkel, H. (1980). Determination of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity measurements by the four-electrode method. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 1216-1221.
- Navarro, V., Barrientos, V., Yustres, A. y Delgado, J. (2008). Settlement of embankment fills constructed of granite fines. *Computers & Geosciences*, 34, 978-992.
- NAVFAC. (1986). Soil mechanics design manual 7.01. Ed. Naval Facilities Engineering Command Alexandria, Virginia, USA, 389 pp.
- Nimmo, J. R. y Daniel, H. (2004). Porosity and pore-size distribution. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 3, 295-303.

- Nixon, M., McCallum, B., Fright, W. y Price, N. (1998). The effects of metals and interfering fields on electromagnetic trackers. *Presence Teleoperators & Virtual Environments*, 7, 204-218.
- Omuto, C. T. y Gumbe, L. O. (2009). Estimating water infiltration and retention characteristics using a computer program in R. *Computers & Geosciences*, 35, 579-585.
- Ophori, D. U. y Maharjan, B. (2000). First approximations of soil moisture retention curves using the filter-paper method. *Hydrological Processes*, 14, 1131-1138.
- Or, D., Tuller, M. y Daniel, H. (2005). Capillarity. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 1, 155-164.
- Pennell, K. D. y Daniel, H. (2005). Specific surface area. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 3, 13-19.
- Peña, D. (2002). Análisis de datos multivariantes. Ed. McGraw Hill, Madrid, 539 pp.
- Peña, E., Suárez, J., Delgado, J., Jácome, A. y Puertas, J. (2006). Analysis of the mobilization of solid loads and heavy metals in runoff waters from granite quarries. *Environmental Geology*, 50, 823-834.
- Qian, T., Huo, L. y Zhao, D. (2010). Laboratory investigation into factors affecting performance of capillary barrier system in unsaturated soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 206, 295-306.
- Quadri, S. S., H., L. y Patil, M. R. (2008). Suitability of industrial process wastes as alternative materials for landfill covers. En: *12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, 2394-2398.
- Rammlmair, D., K.-D-Tacke y Jung., H. (2001). Application of new XRF-scanning techniques to monitor column experiments. *Securing the Future, International Conference on Mining and the Environment*, Skellefteå, 683-692.
- Rammlmair, D., Wilke, M., Rickers, K., Schwarzer, R. A., Möller, A. y Wittenberg, A. (2006). Chapter 7.6. Geology, mining, metallurgy. En: *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*, Ed. B. Beckhoff, B. Kanngießer, N. Langhoff y R. Wedell, Springer, Heidelberg, 640-687.
- Redwan, M. y Rammlmair, D. (2010). Simultaneous monitoring of water saturation and fluid conductivity in unconsolidated sand columns. *Soil Science Society of America Journal*, 74, 1457-1468.
- Regalado, C. M., Muñoz Carpena, R., Socorro, A. R. y Hernández Moreno, J. M. (2003). Time domain reflectometry models as a tool to understand the dielectric response of volcanic soils. *Geoderma*, 117, 313-330.
- Regalado, C. M., Ritter, A., Rodríguez, R. M. y Socorro, A. R. (2005). Diseño experimental para la extracción de solución del suelo en régimen de insaturación (≤ 600 kPa). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 7, 95-100.

- Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J. y Alves, W. J. (1989). Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 53, 433-439.
- Rhoades, J. D. y Oester, J. D. (1986). Solute content. En: *Methods of Soils Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Ed. A. Klute. Soil Science Society of America Journal, Inc., Madison, Wiscconsin, 1, 985-1006.
- Rhoades, J. D., P.A.C., R. y Prather, R. J. (1976). Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content y surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 40, 651-655.
- Richards, L. A. y Weaver, L. R. (1944). Moisture retention by some irrigated soils as related to soil moisture tension. *Journal of Agricultural Research*, 69, 215-235.
- Ritter, A., Munoz-Carpena, R., Regalado, C. M., Javaux, M. y Vancloster, M. (2005). Using TDR and inverse modeling to characterize solute transport in a layered agricultural volcanic soil. *Vadose Zone Journal*, 4, 300-309.
- Ritter, A., Muñoz - Carpena, R., Regalado, C. M. y Socorro, A. R. (2003). Caracterización del transporte de solutos en suelos volcánicos agrícolas mediante TDR y simulación inversa. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 6, 19-24.
- Ritter, A. y Regalado, C. M. (2007). Eficacia de un sensor de capacitancia para medir simultaneamente salinidad y contenido hídrico. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 8, 145-151.
- Robinson, D. A., Bell, J. P. y Batchelor, C. H. (1994). Influence of iron minerals on the determination of soil water content using dielectric techniques. *Journal of Hydrology*, 161, 169-180.
- Robinson, D. A., Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D. y Friedman, S. P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2, 444-475.
- Ruge, J. C. y Lizcano, A. (2005). Efectos de capilaridad en el comportamiento de tablestacas: modelación física numérica de un tablestacado hecho en Hochstetten (Alemania) a escala real. ICYA2004-007. Universidad de los Andes, Bogotá.
- Samper, J., Juncosa, R., Delgado, J. y Montenegro, L. (2000). CORE^{2D}: A code for non-isothermal water flow and reactive solute transport, Users manual version 2. *Publicación Técnica ENRESA*, 131 pp.
- Sandoval E, M., Castillo S, C., Zagal V, E., Stolpe L, N. y Undurraga D, P. (2007). Parámetros hidráulicos determinados en un andisol bajo diferentes rotaciones culturales después de diez años. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7, 32-45.
- Schaap, M. G. y Leij, F. J. (2000). Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 843-851.
- Scheinost, A. C. y Daniel, H. (2005). Metal oxides. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 2, 428-438.

- Schembre, J. M. y Kavscek, A. R. (2003). A technique for measuring two-phase relative permeability in porous media via X-ray CT measurements. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 39, 159-174.
- Seeberg-Elverfeldt, J., Schlüter, M., Feseker, T. y Kölling, M. (2005). A Rhizon in situ sampler (RISS) for pore water sampling from aquatic sediments. *Limnology and Oceanography: Methods*, 3, 361-371.
- Seetharam, S. C., Cleall, P. J. y Thomas, H. R. (2006). Modelling some aspects of ion migration in a compacted bentonitic clay. *Engineering Geology*, 85, 221-228.
- Seidel, K. y Lange, G. (2007). Direct Current Resistivity Methods. *Environmental Geology*, 1, 205-237.
- Sharma, R. (2009). Soil and landscape factors affecting phosphorous loss from the Fitzgerald river catchment in south west of western Australia. *Tesis Doctoral inédita*, Murdoch University, Murdoch, 338 pp.
- Shotbolt, L. (2010). Pore water sampling from lake and estuary sediments using Rhizon samplers. *Journal of Paleolimnology*, 44, 695-700.
- Silva, B., Barral, M. T., García-Rodeja, E. y Vázquez, N. (2000). Evaluación del uso de lodos graníticos como enmienda y fertilizante de suelos ácidos. *Informe Departamento de Edafología y Química Agrícola*, Universidad de Santiago de Compostela, 88 pp.
- Slater, L. y Binley, A. (2006). Synthetic and field-based electrical imaging of a zerovalent iron barrier: Implications for monitoring long-term barrier performance. *Geophysics*, 71, 129-137.
- Slater, L. D., Choi, J. y Wu, Y. (2005). Electrical properties of iron-sand columns: implications for induced polarization investigation and performance monitoring of iron-wall barriers. *Geophysics*, 70, 87-94.
- Soracco, C. G., Filgueira, R. R., Sarli, G., Fournier, L., Gelati, P. R. y Hilbert, J. (2009). Persistencia del efecto del subsolado sobre el movimiento del agua en el suelo en siembra directa. Uso de dos modelos teóricos. *Ciencia del Suelo*, 27, 77-87.
- Sparks, D. L. y Daniel, H. (2005). Sorption, metals. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 3, 532-537.
- Starr, J. L. y Paltineanu, I. C. (2002). Capacitance devices. En: *Methods of Soil Analysis. Part 4.*, Ed. J.H.Dane and G.C.Topp, Soil Science Society of America Inc., Madison, WI., 4, 463-474.
- Sumner, J. S. (1976). Principles of induced polarization for geophysical exploration. Ed. Elsevier, 277 pp.
- Swartzendruber, D. y Daniel, H. (2005). Darcy's law. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 1, 363-369.
- Taud, H., Martínez-Angeles, R., Parrot, J. F. y Hernández-Escobedo, L. (2005). Porosity estimation method by X-ray computed tomography. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 47, 209-217.

- Thomas, H. R. (1985). Modelling two-dimensional heat and moisture transfer in unsaturated soils, including gravity effects. *International Journal of Analytical Methods in Geomechanics*, 9, 573-588.
- Topp, G. C., Ferré, T. P. A. y Daniel, H. (2005). Time-domain reflectometry. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 4, 174-181.
- Tuller, M., Or, D. y Daniel, H. (2005). Water retention and characteristic curve. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 4, 278-289.
- Van Brakel, J. y Heertjes, P. M. (1974). Analysis of diffusion in macroporous media in terms of a porosity, a tortuosity and a constrictivity factor. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 17, 1093-1103.
- Van den Akker, J. J. H., Soane, B. y Daniel, H. (2005). Compaction. En: *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Ed. Elsevier, Oxford, 1, 285-293.
- Van der Salm, C., Denier van der Gon, H., Wieggers, R., Bleeker, A. y van den Toorn, A. (2006). The effect of afforestation on water recharge and nitrogen leaching in The Netherlands. *Forest Ecology and Management*, 221, 170-182.
- Van Genuchten, M., Leij, F. y Yates, S. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. *Technical Report EPA/600/2-91/065*, US Environmental Protection Agency, 85 pp pp.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Vaquero, I. (2004). Manual de diseño y construcción de vertederos de residuos sólidos urbanos. *E.T.S.I. Minas-U.P.M.*, Madrid, 360 pp.
- Vázquez, A. (2005). Modelización Geoquímica de los Serrines de Granito. *Tesis Doctoral inédita*, Universidade da Coruña, A Coruña, 295 pp.
- Vázquez, A., Fernández-Bogo, S., Delgado, J., Falcón, I., Barrientos, V., Juncosa, R., Missana, T., Alonso, U. y Martín, P. L. (2008). Determinación del punto Isoeléctrico de residuos de grano fino y su potencial uso en la neutralización de aguas ácidas. *MACLA*, 9, 255-256.
- Vázquez, A., Juncosa, R., Barrientos, V., Falcón, I. y Delgado, J. (2007). Hydrodynamic and reactive transport modeling of the behavior of compacted granite saw dust for landfill liners & covers. *Water-Rock Interaction*, 1, 653-657.
- Vogel, H. J. y Roth, K. (2003). Moving through scales of flow and transport in soil. *Journal of Hydrology*, 272, 95-106.
- Vogel, T., van Genuchten, M. T. y Cislérova, M. (2000). Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advances in Water Resources*, 24, 133-144.
- Vogeler, I., Clothier, B. E., Green, S. R., Scotter, D. R. y Tillman, R. W. (1996). Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 5-12.

- Warrick, A. W. y Amoozegar-Fard, A. (1977). Soil water regimes near porous cup water samplers. *Water Resources Research*, 13, 203-207.
- Weihermüller, L., Kasteel, R., Vanderborght, J., Pütz, T. y Vereecken, H. (2005). Soil water extraction with a suction cup. *Vadose Zone Journal*, 4, 899-907.
- Weller, A., Frangos, W. y Seichter, M. (2000). Three-dimensional inversion of induced polarization data from simulated waste. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 67-83.
- Wu, Y., Slater, L. D. y Korte, N. (2005). Effect of precipitation on low frequency electrical properties of zerovalent iron columns. *Environmental Science & Technology*, 39, 9197-9204.
- Wu, Y., Slater, L. D. y Korte, N. (2006). Low frequency electrical properties of corroded iron barrier cores. *Environmental Science & Technology*, 40, 2254-2261.
- Yang, C., Kao, S., Lee, F. y Hung, P. (2004). Twelve different interpolation methods: a case study of Surfer 8.0. *20th ISPRS Congress*, Istanbul, 778 ff.