

Dióxido de silicio sódico evaluado para su empleo como medio poroso inerte

Gerardo Grisolia, Gonzalo M. Aiassa & Pedro A. Arrúa
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Grupo GIGEF, Civil. Córdoba, Argentina.
Marcelo G. Eberhardt
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Grupo GIGEF, Departamento de Ingeniería Civil. Córdoba, Argentina



ABSTRACT

The silty-clay soils cover a wide extension of lands fit for tillage of the center of Argentina. The eolic formation posses a macroscopic behaviour linked to the genesis and it is estimated that the hydraulic performance is consequence of the structure and chemical composition that interacts with soil matrix. The study of groundwater contamination requires modeling by means of physical and mathematical algorithms. In this study we propose a mechanism to generate artificial soil with commercial silicon dioxide. This material will be used to measure the infiltration rate with low interaction between solute and the porous media matrix. The methodology for the generation of artificial soil at low scale, with the same granulometric distribution and others properties of the soil under study, is fully described.

PRESENTACIONES TÉCNICAS

En la región cultivable del centro de Argentina, el limo-arcilloso loésico se extiende en gran parte de su superficie. La formación eólica posee un comportamiento macroscópico estrechamente vinculado al proceso de formación y se estima que el desempeño hidráulico se debe a la estructuración y su composición química. La determinación de la contaminación del agua subterránea requiere de modelos físicos y matemáticos. En este artículo se presenta una alternativa para la generación de suelo artificial con dióxido de silicio que posteriormente será empleado para caracterizar la tasa de infiltración con escasa interacción entre el soluto y la matriz del medio poroso. Se presenta la metodología de fabricación de suelo artificial a escala de laboratorio, reproduciendo la distribución granulométrica y otras propiedades del suelo.

1 INTRODUCCIÓN

Los productos químicos liberados en los suelos y subsuelos por actividades antrópicas son una de las principales causas de contaminación, presentándose en algunos casos situaciones irreversibles desde el punto de vista económico y técnico. Por este motivo, entre otros, la contaminación del agua subterránea se intensifica día a día (Flury et al. 2002).

La presencia de contaminantes en los acuíferos subterráneos es consecuencia del transporte a través del suelo de sustancias que han sido derramadas en la superficie. Las sustancias son transportadas por el acuífero con elevada potencialidad de contaminar zonas alejadas y otros acuíferos.

Los principales eventos que generan contaminación corresponden a derrames, disposición de líquidos domésticos e industriales, vertidos ilegales, aplicación de fertilizantes y de productos fitosanitarios.

Con el objetivo de lograr una gestión adecuada de los recursos, suelo y agua subterránea, es necesario conocer y dominar los procesos asociados al transporte de los potenciales contaminantes en cada región. Poder predecir las formas de transporte y el destino de los contaminantes resulta vital para poder evaluar los efectos sobre acuíferos locales y el resultado esperado de las acciones de prevención y remediación (Wexler, E.J. 1992).

El suelo loésico está constituido por una estructura con macroporos (Teruggi, M.E. 1957; Zárate, M.A. 2003; Iriondo M.H. 1997). En estos lugares el flujo del agua y otros fluidos es prácticamente independiente de las características hidrodinámicas de la matriz del suelo (Flury, M. and Bezdicek D. 2004; Dudley, J. H. 1970; Iriondo, M. and Kröhling, D. 1997). La velocidad del flujo por estos sistemas es mucho mayor que por los sistemas de microporos constituyentes de la matriz (Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. 1993; Lu, N. and Likos, W.J. 2004; Mitchell, J. K. 1993; Gibbs, H. and Holland, W. 1960).

Es muy importante conocer las propiedades hidrodinámicas del suelo, especialmente en los casos donde los potenciales contaminantes serían escasamente retenidos. Estos datos permiten cuantificar el riesgo de contaminación del subsuelo y el agua subterránea.

Algunos de los constituyentes del suelo con mayor capacidad reactiva son la material orgánica, los compuestos de hierro, aluminio y la arcilla. Estos materiales y su interacción con los contaminantes determinan el mecanismo de propagación de los solutos. Trabajar con los constituyentes del suelo en estado puro como matriz permite estudiar los mecanismos de interacción de éstos con los contaminantes estudiados (Stumm, W. 1992; Fetter, C.W. 1999).

Si bien en la estructura natural de un suelo hay una gran cantidad de macroporos que constituyen los caminos preferenciales de flujo presentan un

comportamiento particular para cada región de suelo, incluso dentro de una misma parcela. Como punto de partida y herramienta para desarrollar un conocimiento del problema se aplica una metodología de trabajo consistente en utilizar columnas de suelo remoldeado en laboratorio para obtener los parámetros o índices que identifican los procesos que ocurren cuando un fluido con sustancias disueltas y suspendidas lo atraviesan continuamente. Esta metodología de trabajo tiene ventajas respecto del trabajo en etapas o batch, principalmente porque las condiciones de ensayo son de mayor similitud a las reales de ocurrencia del fenómeno en el tiempo.

En el presente trabajo se plantea la posibilidad de generar suelo artificial con material inerte, que posea similar granulometría, índices de plasticidad y características hidráulicas equivalentes al limo loésico del centro de Argentina. Se presume que esto permitiría aislar y cuantificar los parámetros hidráulicos de las ecuaciones de advección-difusión.

Se ha empleado como material inerte Dióxido de Silicio Sódico Comercial (DS), de simple adquisición, manipulación y composición química conocida.

2 METODOLOGÍA

2.1 Equipo para generación de suelo artificial

Para moler el material inerte y obtener una distribución granulométrica análoga al suelo en estudio se procedió a fabricar un molino del tipo de bolas.

Se utilizaron bolas de acero inoxidable de 19,05 mm de diámetro. La carcasa del molino es de 210 mm de diámetro interno y gira a 81 rpm (Perry, R. and Green, D. 2008; Alcántara Valladares J. R. 2008). Esta máquina es accionada por un motor eléctrico WEG de 124 J s^{-1} , de 1500 rpm. Posee, además un sistema de reducción de velocidad por correas y poleas. En la Figura 1 se muestra un esquema de la máquina.

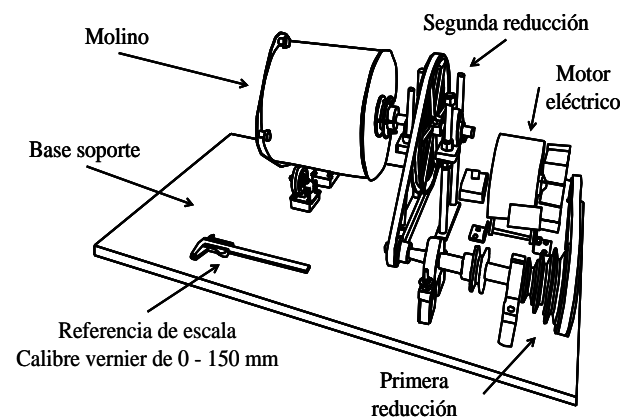


Figura 1. Molino de bolas

2.2 Adecuación del material inerte

El suelo utilizado como parámetro base corresponde a

loess de la región central de nuestro país (Grisolía, G. et al. 2010). Sus características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características geotécnicas del suelo en estudio

Parámetros	Valores
Límite líquido (%)	24,4
Índice de plasticidad (%)	3,4
Partículas < 0,250 mm (%)	100,0
Partículas < 0,075mm (%)	81,0
Partículas < 0,002mm (%)	16,0
Relación de vacíos (e)	1,05
Porosidad (n)	0,51
Peso unitario seco máximo γ_d (kN/m^3)	17,2
Gravedad específica (Gs)	2,68
Clasificación USCS	ML

El material inerte utilizado es (DS), también denominado vidrio sódico cálcico. Los componentes principales de este material son dióxido de silicio (SiO_2) proveniente de arena y carbonato sódico (Na_2CO_3) y piedra caliza (CaCO_3) que se añaden durante el proceso de fabricación (Shelby, J. 2005). En la Tabla 2 se presenta la composición característica del material.

Tabla 2. Composición del material

Componente	Contenido en peso [%]
Na_2O	8,17
MgO	3,32
Al_2O_3	0,10
SiO_2	78,10
K_2O	0,36
CaO	8,86
FeO	1,08

El material inerte fue acondicionado mediante molienda, utilizando el tiempo y las condiciones adecuadas para generar un material con propiedades geotécnicas de clasificación de suelos equivalentes a las obtenidas con el limo-loésico. (Grisolía, G. et al. 2010).

2.3 Equipo para ensayos de infiltración

Se utilizó la metodología de infiltración a carga variable dado el tamaño de los granos del suelo en estudio (Das B. 2008). En la Figura 2 se puede apreciar el arreglo de infiltración utilizado.

El equipamiento se compone por buretas de vidrio graduadas de 100 ml de capacidad, moldes según norma ASTM D-1883 construidos en acrílico, un cronómetro digital y vasos de precipitados tipo Griffin construidos en vidrio. El arreglo mostrado permite realizar dos ensayos simultáneamente.

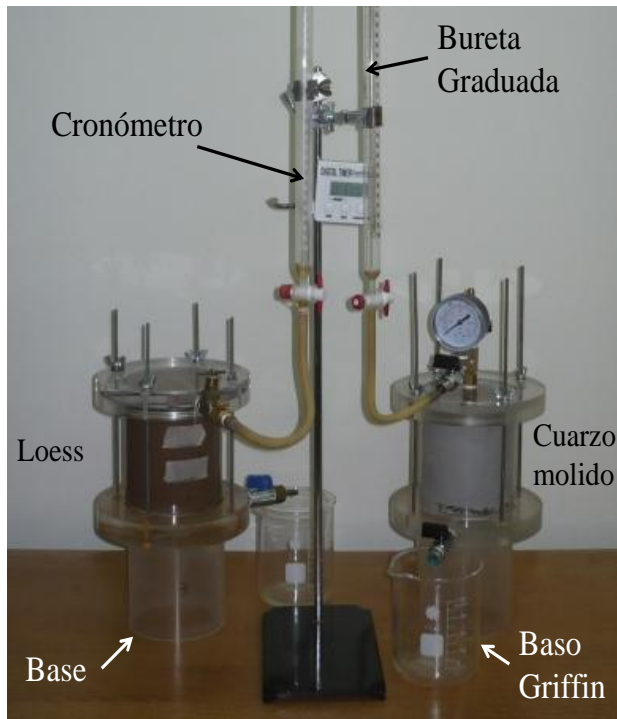


Figura 2. Dispositivo para infiltración a carga variable

Para realizar los ensayos se utilizó agua desionizada por resina de intercambio iónico. Se contrastó la cantidad de líquido infiltrado con la cantidad recogida a los fines de verificar que se logran condiciones estacionarias al final de los ensayos (hipótesis de continuidad).

3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Con el fin de determinar el tiempo de molienda necesario para obtener material adecuado para ser utilizado como suelo artificial se construyeron bandas granulométricas con los datos obtenidos de distintas muestras de ambos materiales, mediante el método del hidrómetro ASTM 152H.

En la Figura 3 se muestra la banda de distribución granulométrica correspondiente al suelo determinada por las líneas continuas, mientras que la correspondiente a las muestras de DS está delimitada por las líneas discontinuas. Los valores correspondientes a suelo presentan una banda de valores debido a que proceden de distintos puntos de muestreo, pero mantienen una relación estrecha entre sí.

La muestra de DS adecuada es la que se encuentra contenida en ambas bandas. Notar que el DS (V1 a V4) presenta una distribución granulométrica similar a las muestras de loess (SA-SB-SC-SP).

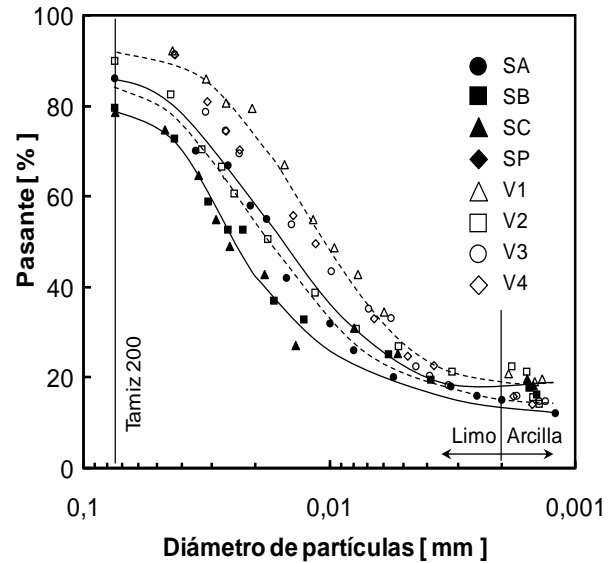


Figura 3. Bandas de distribución granulométrica de ambos materiales

El suelo artificial obtenido (muestra V2) fue caracterizado midiendo las propiedades índices empleadas tradicionalmente en geotecnia. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Características geotécnicas DS

Parámetros	Valores
Límite líquido (%)	26,7
Índice de plasticidad (%)	1,32
Partículas < 0,250 mm (%)	100,0
Partículas < 0,075 mm (%)	89,9
Partículas < 0,002 mm (%)	17,0
Peso unitario seco máximo (γ_d) (kN/m^3)	16,7
Gravedad específica (Gs)	2,39
Clasificación USCS	ML

En este caso no se informan los valores de porosidad y relación de vacíos ya que no es un material que exista en la naturaleza. Además, el DS se utilizará seleccionando los valores que se crea conveniente para estos dos parámetros en función del suelo de referencia.

En la Figura 4 se presenta la relación entre el peso unitario seco (γ_d) y el contenido de humedad (w) en el ensayo de Proctor estándar. Se puede apreciar que el DS presenta características de arena mal graduada en el ensayo de Proctor estándar según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Das B. 2008), con valores de peso unitario seco máximo (γ_{dmax}) en el mismo orden de magnitud al del suelo en estudio. Este ensayo se realizó para ampliar el conocimiento de las propiedades de interés a los fines de este estudio.

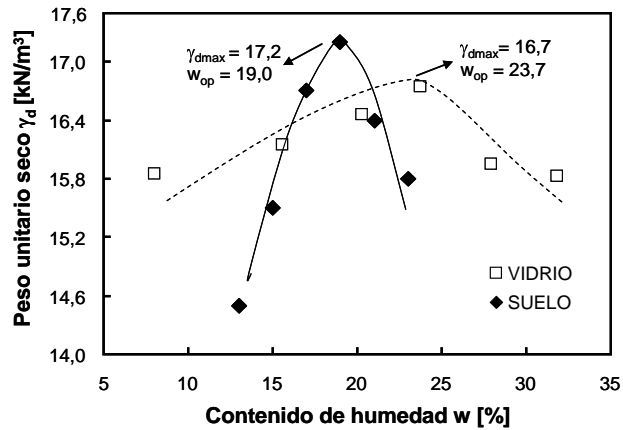


Figura 4. Ensayos de Compactación Proctor estándar

Se comparó la permeabilidad de ambos materiales al agua desmineralizada, trabajando con igual relación de vacíos ($e = 1$). Por relaciones gravimétricas se obtuvo que la probeta de DS se debía construir a un peso unitario seco de 12 kN/m^3 y la de suelo a 13 kN/m^3 . En ambos casos se procedió a confeccionar las muestras por compactación estática. En la Figura 5 se puede observar que los valores de permeabilidad en función del volumen de agua infiltrado para estos materiales bajo estas condiciones de relación de vacíos son del mismo orden de magnitud. Esta propiedad tiene una importancia particular porque se pretende utilizar el DS como sustituto del loess en el estudio de transporte de contaminantes a través del suelo. El DS presenta un valor de permeabilidad no saturada de aproximadamente $3 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$, típico de arcilla limosa (Das B. 2008), y el loess $8 \times 10^{-6} \text{ cm s}^{-1}$.

Como puede observarse en la Figura 5 el DS presenta una dispersión de valores menor que el loess debido a su estructura química. Ésta no favorece las interacciones de carácter dipolo-dipolo, ni dipolo-dipolo inducido, con el agua. Este tipo de interacción está presente en el sistema agua-loess.

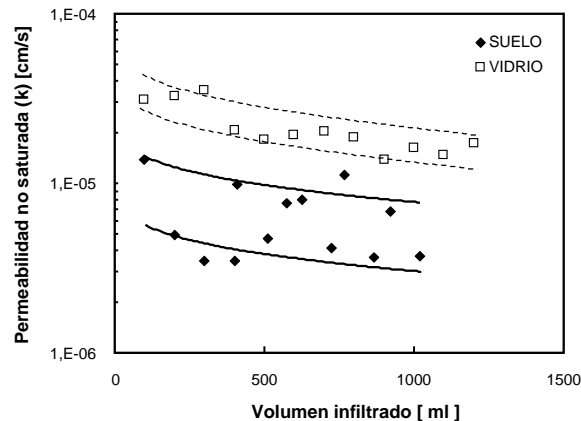


Figura 5. Permeabilidad en función del volumen infiltrado

Al desarmar el molde utilizado para la infiltración, que contenía el DS, se pudo observar que la parte superior y

la base habían perdido todo tipo de adhesión. Esta situación se evidenció por encontrar material que presentaba a la vista, cierto grado de fluidez en ambos extremos. Esto habría ocurrido debido a una saturación próxima al 100 % en el fondo y el tope del molde, según se puede verificar en la Figura 6. En el ensayo de Proctor estándar, mostrado en la Figura 4, ocurrió el mismo fenómeno para grandes valores de contenido de humedad. La parte central de los moldes, en cambio, presentaba un grado de adherencia apreciable, de manera tal que el material se soportaba por sí mismo dentro del cilindro.

En el molde que contenía la muestra de suelo no se observó el fenómeno descrito en las partes inferior y superior del molde con DS. La totalidad del material se soportaba a sí mismo.

El valor observado para la humedad en la región media para ambos materiales podría deberse a la formación de caminos de flujo preferencial en la estructura, por los cuales el agua fluye con mayor velocidad y cantidad hacia la parte inferior de los moldes.

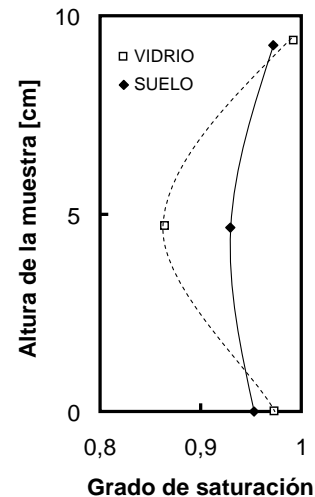
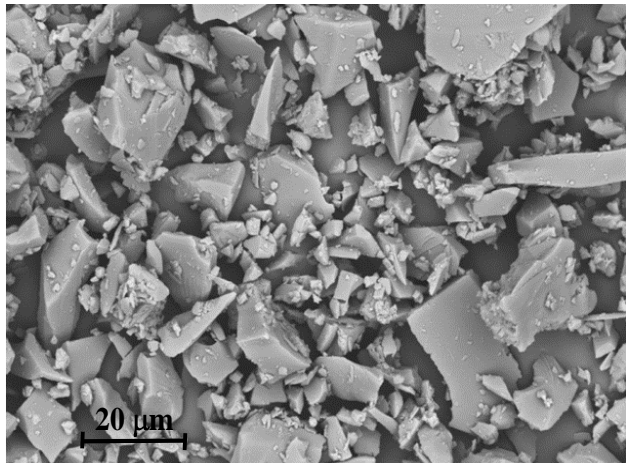


Figura 6. Variación del grado de saturación en función de la altura de la muestra

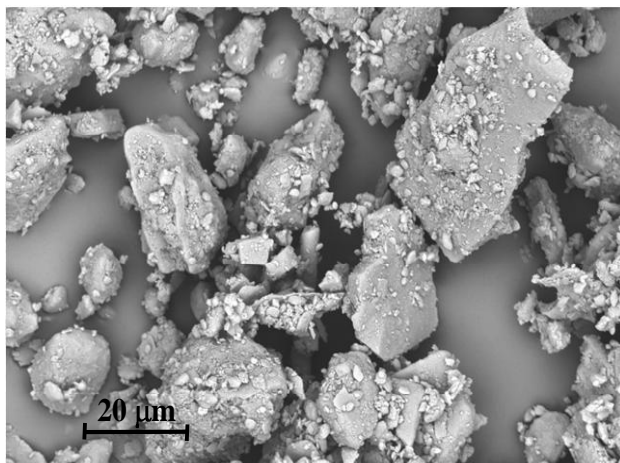
Se observaron las partículas de suelo y las de DS en un microscopio electrónico de barrido LEO 1450 VP. De estas observaciones se registraron imágenes con electrones secundarios y electrones de retrodifusión. El objetivo de esta actividad fue estudiar las características morfológicas de las partículas constitutivas de los materiales en estudio, y eventualmente compararlos. Las muestras fueron montadas en portamuestras de aluminio recubiertas con una capa de oro de 30 nm de espesor. Este recubrimiento se utiliza para asegurar la conductividad superficial, de manera tal que no ocurran distorsiones o efectos no deseados en las imágenes por falta de conductividad eléctrica o térmica.

En las microfotografías de la Figura 7 se registraron partículas de DS (a) y de suelo (b) a 1000 x de aumento.

El material de las microfotografías tiene dimensiones del orden de 0,075 mm, es decir, del límite superior para los limos.



(a)



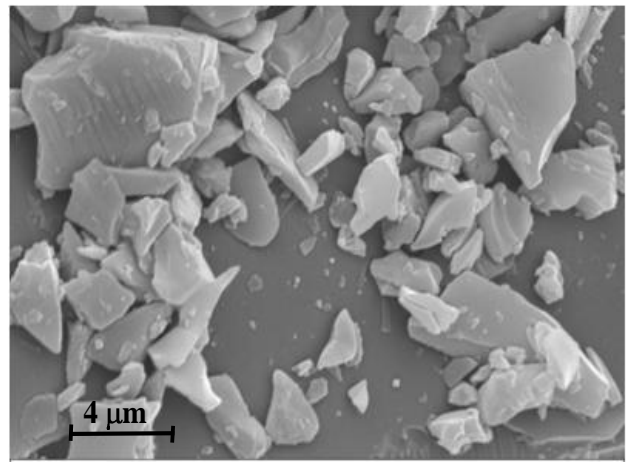
(b)

Figura 7. Micrografías de los materiales en estudio. (a) DS y (b) Suelo loésico

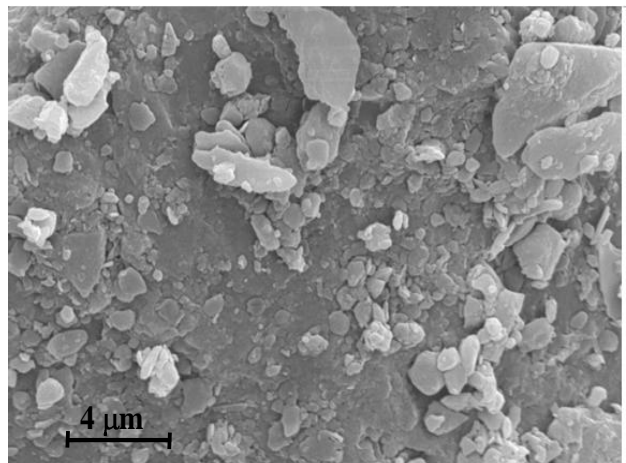
En (a) se observa que el material presenta bordes angulosos e irregulares dentro de cada porción de material y entre las distintas porciones, típicos de los materiales frágiles. En contraste, el suelo presenta bordes redondeados, típico de un material de poca fragilidad.

En las micrografías de la Figura 8 se observan partículas cuyas dimensiones corresponden al límite superior para las arcillas (0,002 mm, límite inferior para los limos). En la micrografía (b) se ve claramente la estructura de las hojuelas típicas de las arcillas (Manahan, S. 2006), y en la (a) que el DS presenta una morfología diferente de la anterior, principalmente en la forma de las partículas individuales.

Realizando observaciones a esta escala resulta difícil determinar las diferencias en la forma de los bordes de las partículas.



(a)

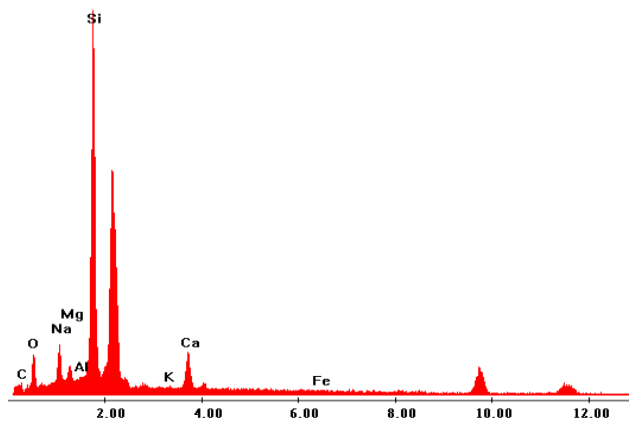


(b)

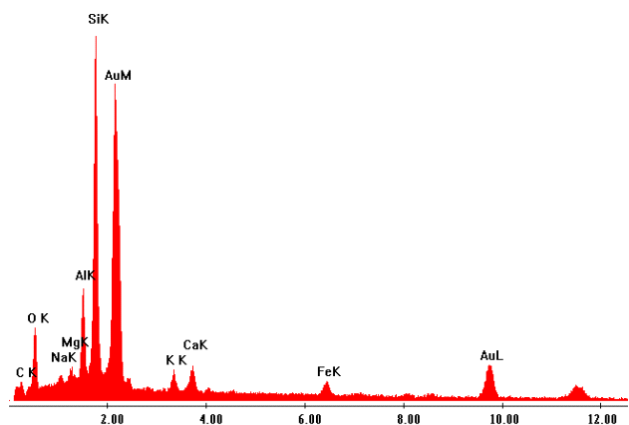
Figura 8. Micrografías de los materiales en estudio. (a) DS y (b) suelo loésico

Los principales compuestos del suelo que interactúan con los solutos son los del aluminio, del hierro y la materia orgánica. Los gráficos presentados en la Figura 9 corresponden a los micro-análisis realizados sobre muestras de DS y suelo. El micro-análisis presentado en la Figura 9a muestra que el DS no tiene cantidades relevantes para este estudio de elementos químicos que puedan formar compuestos capaces de interactuar con los solutos de interés. En el suelo (b), por el contrario, están presentes los materiales (hierro y aluminio) que interactúan con los solutos.

En los gráficos de la Figura 9 el eje de las ordenadas se representa la intensidad (cuentas) y en el de las abscisas la energía utilizada en keV.



(a)



(b)

Figura 9. Gráficos de los micro-análisis de los materiales estudiados. (a) DS y (b) suelo loésico

4 CONCLUSIONES

Las características hidráulicas de un suelo son consecuencia de su estructuración y su composición química. Esta última define las interacciones que existen entre el fluido infiltrado, las sustancias disueltas en él y la matriz del medio poroso.

En este trabajo se generó suelo artificial con dióxido de silicio sódico (DS) comercial caracterizando la metodología de producción. Los resultados comparativos entre suelo artificial y loess de mayor relevancia son:

(a) La granulometría del material inerte se obtiene en función del tiempo de molienda. El tiempo óptimo de molienda es de una hora para material pasante tamiz N° 20 ASTM E - 11/95 y retenido en tamiz N° 30 ASTM E - 11/95.

(b) Las clasificaciones de ambos materiales en el sistema USCS son coincidentes (ML).

(c) La gravedad específica que presentan los materiales se mantiene en el mismo orden de magnitud

(d) En el ensayo de compactación Proctor estándar ambos materiales presentan el mismo orden de magnitud para el peso unitario seco y húmedo, no obstante las curvas que presenta cada material tienen diferente forma.

(e) Los coeficientes de permeabilidad para ambos materiales infiltrados con agua desmineralizada son de igual orden de magnitud.

(f) El DS presenta una interacción con el agua marcadamente inferior que el suelo. La dispersión obtenida en los ensayos de infiltración permite concluir que el suelo artificial posee baja afinidad con el agua desmineralizada, a diferencia con lo que ocurre en el loess.

(g) Estos materiales presentan propiedades morfológicas diferentes pero parecen no presentar influencia notable en las propiedades hidrodinámicas del material reconstituido.

(h) Los materiales susceptibles de interactuar con los plaguicidas están presentes en cantidades despreciables, o ausentes en el caso de hierro, comparadas con la del suelo, por lo cual el DS se comportaría como material inerte.

En base a los resultados obtenidos, los autores admiten la posibilidad de emplear dióxido de silicio sódico comercial molido en reemplazo del loess para estudios de laboratorio que requieran eliminar ciertas interacciones entre la solución infiltrada (agua + solutos) y el medio poroso estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología, al Departamento de Ingeniería Civil de la UTN-FRC y al Ministerio de Ciencia y Tecnología de la provincia de Córdoba. El Ing. Gerardo Grisolia agradece especialmente la Beca Bicentenario que otorga la Universidad Tecnológica Nacional y al Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microanálisis de la Universidad Nacional de San Luis.

REFERENCIAS

- Alcántara Valladares J. R., 2008. Diseño práctico de un molino de bolas. Mexico. Instituto Politécnico Nacional. Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Azcapotzalco.
- ASTM 2002. *Soil and Rock*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.09.
- Das B. 2008. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. CENGAGE Learning, México
- Dudley, J. H. 1970. Review of Collapsing Soils. *Journal of Soils Mechanics and Foundations Division*. ASCE. Vol. 96 (SM3), pp.925-947.
- Fetter, C.W. 1999. *Contaminant Hydrogeology*. 2nd Ed. Prentice Hall. Oshkosh, WI. USA.
- Flury, M. et al. 2002. *Solute diffusion in Methods of Soils Analysis, Part 4, Physical Methods*, J. H. Dane, and

- G. C. Topp, pp. 1323-1351, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI.
- Flury, M. and Bezdicek, D. 2004. Hydraulic Properties in a Silt Loam Soil under Natural Prairie, Conventional Till, and No-Till, *Soil Science Society of America Journal*. 68:1679–1688.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- Gibbs, H. and Holland, W. 1960. Petrographic and Engineering Properties of Loess. *Engineering Monograph N° 28. U.S. Bureau of Reclamation*.
- Grisolía, G. Arrúa, P. y Aiassa, G. 2010. Desarrollo de suelo artificial para la evaluación del transporte de contaminantes en medios porosos. *Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2010, CAMSIG 2010*. Mendoza, Argentina.
- Iriondo M.H. 1997. Models of deposition of loess and loessoids in upper quaternary of South America, *Journal of South America Earth Sciences*, Vol. 10, No. 1, pp. 71-79.
- Iriondo, M. and Kröhling, D. 1997. The tropical loess. In: An, Z. and Zhou, W. (Eds.), *Quaternary Geology, Proceedings of the 30th International Geological Congress, Beijing*. 21: 61-77.
- Lu, N. and Likos, W.J. 2004. *Unsaturated soil mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- Manahan, S. E. 2006. Introducción a la química ambiental. Reverté. 1er Ed. Buenos Aires. Argentina.
- Mitchell, J. K. 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.
- Perry, R. and Green, D. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8th Edition. McGraw-Hill. USA
- Shelby, J. 2005. *Introduction to glass science and technology*. 2nd edition. Royal society of chemistry. Cambridge CB4 0WF, UK.
- Stumm W., 1992. *Chemistry of the Solid-Water Interface*, John Wiley & Sons, Inc. New York, . NY, USA. in Jerez J. and Flury M., 2005. Humic acid, ferrihydrite, and aluminosilicate coated sands for column transport experiments
- Teruggi, M.E. 1957. The nature and origin of Argentinian loess, *Journal of Sedimentary Petrology*. 27: 322-332.
- Wexler, E.J. 1992. Analytical solutions for one-, two-, and three-dimensional solute transport in ground-water systems with uniform flow Supplemental Report: Source codes for computer programs and sample data sets, U.S. Geological Survey Open-File Report 92-78, 3 p., 1 computer diskette.
- Zárate, M.A. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews*. Elsevier. 22: 1987-2006.