



## Desempeño de Barreras Sanitarias Simples de Suelo Loésico Compactado

Gonzalo M. Aiassa<sup>1</sup> y Pedro A. Arrúa<sup>2</sup>

Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Córdoba. Departamento de Ingeniería Civil. Tel: 54-351-5986019#6, CP.(X5016ZAA), Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina. <sup>1</sup>Laboratorio de Investigación en Geoestructuras, gaiassa@scdt.frc.utn.edu.ar; <sup>2</sup>Laboratorio de Investigación en Geocaracterización de Sitios, parrua@cbasicas.frc.utn.edu.ar

**RESUMEN** - En los depósitos de residuos, frecuentemente se emplean barreras simples de suelo compactado para limitar la fuga de contaminantes hacia el suelo y el agua subterránea. La definición de criterios de diseño para estas barreras, demanda la necesidad de contar con herramientas numéricas que permitan predecir el comportamiento hidráulico y mecánico del sistema. En este trabajo, se presenta un análisis del problema infiltración-asentamiento, mediante el desarrollo e implementación de modelos numéricos capaces de predecir y evaluar el desempeño de barreras de suelo limoso compactado instaladas sobre suelos naturales colapsables. Estos modelos fueron, calibrados a partir de resultados experimentales de infiltración y compresión confinada en muestras de suelos inalteradas y compactadas, y aplicados al análisis de un caso de estudio compuesto por diferentes escenarios. Los resultados obtenidos fueron empleados para formular recomendaciones de diseño y construcción de barreras de suelo limoso compactado, instaladas en regiones de suelos loésicos colapsables.

**Palabras clave:** Infiltración; colapso; vertederos; residuos

### Performance of Compacted Loess Soils as Liners for Waste Landfills

**Abstract** - In waste landfill, compacted soil liners are used to limit the leakage of contaminants into the soil and groundwater. A numerical tool to predict the hydraulic and mechanical behavior of the system is needed for the liners design criteria definition. This work presents a numerical analysis of the infiltration-settlement problem, through the development and implementation of models, which can predict and assess the performance of compacted soil liners installed on natural collapsible soils. These models, calibrated from experimental results of infiltration and confined compression tests on disturbed and undisturbed soil samples, were applied to the analysis of a case of study involving different scenarios. The results were used to formulate recommendations for the design and construction of compacted silty soil liners installed on collapsible loess soil region.

**Keywords:** Infiltration; collapse; landfills; waste

## INTRODUCCIÓN

Los depósitos sanitarios constituyen un método común para la disposición final de residuos urbanos. Uno de los principales componentes de estos depósitos son los sistemas de barreras destinados a limitar la fuga de contaminantes hacia el ambiente (Sharma y Lewis, 1994, Manassero *et al.*, 2000). En la actualidad existen numerosas soluciones tecnológicas, tales como materiales geosintéticos o geomembranas, que permiten generar sistemas de barreras efectivos (Zornberg y Christopher, 2006). No obstante, estos tipos de soluciones, no siempre resultan accesibles a pequeños o medianos municipios. Una alternativa, que se complementa con el uso de estas soluciones o puede emplearse de manera individual, la constituye el empleo de barreras de suelo compactado. En general, esta solución resulta económica y demanda tecnología de fácil disponibilidad para su implementación.

El uso de barreras de suelo compactado como elemento de contención en depósitos, ha dado lugar a numerosas investigaciones en el mundo destinadas a caracterizar el comportamiento y propiedades del suelo en diferentes condiciones de compactación (Wang y Benson, 1995, Meerdink *et al.*, 1996). En particular, los suelos de la zona central de Argentina pertenecientes a la llanura cordobesa, presentan características de comportamiento particulares relacionadas con su génesis. Estos suelos, de formación loésica, pertenecen al grupo de los suelos colapsables, los cuales pueden sufrir grandes cambios volumétricos en su estructura debido a incrementos, aislados o combinados, del contenido de humedad y estado tensional. Las investigaciones

sobre el comportamiento de barreras de suelo compactado instaladas en este medio, y la generación de regulaciones que establezcan criterios claros y fundamentados de diseño y construcción, son aún un tema en desarrollo (Aiassa *et al.*, 2006).

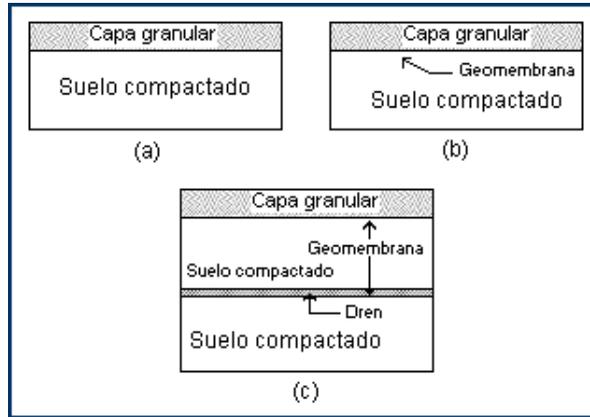


Fig.1: Tipos de barrera, (a) simple con sistema granular de drenaje, (b) compuesta, (c) compuesta doble

El control de calidad durante la construcción, resulta de alta importancia en el objetivo de lograr un adecuado desempeño de las barreras de suelo compactado (Daniel, 1990). En la verificación de las condiciones de compactación de barreras, frecuentemente se utiliza la humedad y el peso unitario seco del suelo en campo como variables de control. En la metodología de diseño tradicional, usualmente se requiere que la barrera sea compactada entre un rango específico de contenido de humedad ( $w$ ) y por sobre un valor mínimo de peso unitario seco ( $\gamma_d$ ). Esta última condición se define a partir del coeficiente de compactación relativa,  $CR$ , el cual se obtiene como la relación entre el peso unitario seco obtenido en campo,  $\gamma_{dcampo}$ , y el peso unitario seco máximo de laboratorio,  $\gamma_{dmax}$ , para una energía de compactación determinada. Esto define una zona aceptable en base a la práctica común de ingeniería (Fig. 2). El valor de  $CR$  frecuentemente establecido es de 0,95 (95%) para el ensayo Proctor Estándar (PE) y 0,90 (90%) para el ensayo Proctor Modificado (PM). El rango de humedad de compactación aceptable varía con el tipo de suelo, pero en general para barreras se especifica la zona entre 0 y 4% en rama húmeda respecto de la humedad óptima (Daniel y Benson, 1990).

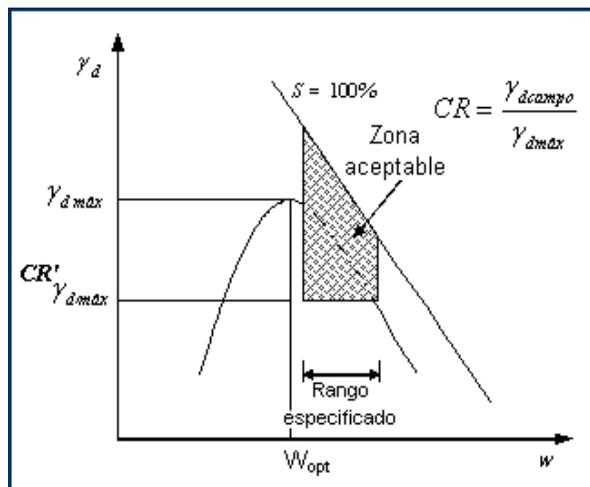


Fig. 2: Método tradicional para especificaciones de barreras de suelo compactado

Usualmente, las agencias de regulación establecen espesores mínimos de barreras de suelo compactado con el objetivo de procurar un adecuado desempeño del sistema. No obstante, existen muchas dificultades que influyen en la adopción de un espesor apropiado para la barrera. Benson y Daniel (1994) presentaron resultados de infiltración en barreras con diferentes espesores y niveles de compactación (Fig. 3). Los resultados muestran que las barreras de solo 15 a 30 cm (1 o 2 capas) de espesor, tienden a ser mucho más

permeables que las de 60 a 90 cm (4 a 6 capas). No obstante, cuando las barreras incrementan el espesor por sobre los 90 cm, se observaron pequeñas reducciones en la permeabilidad.

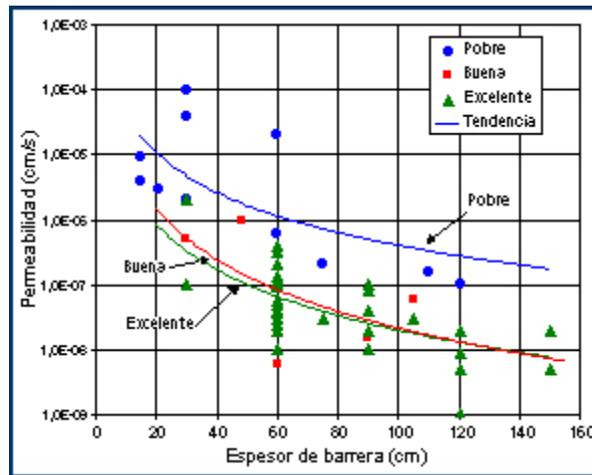


Fig. 3: Mediciones de permeabilidad de campo en barreras de diferentes espesores (Benson y Daniel, 1994)

### MODELO DE INFILTRACIÓN

Para resolver el problema de flujo transitorio no saturado se implementaron códigos de entrada en el programa de cálculo UN-SAT-H, (*Unsaturated Soil Water and Heat Flow Model*) (Fayer, 2000). UNSAT-H es una herramienta numérica de dominio público, el modelo conceptual es unidimensional y no considera flujo lateral. En su análisis, el programa separa las precipitaciones caídas sobre la superficie en infiltración y escurrimiento superficial. Las ecuaciones empleadas en la representación del modelo conceptual se resuelven numéricamente mediante el esquema en diferencias finitas de Crank-Nicolson. La ecuación diferencial básica corresponde a:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\psi)_z \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

donde  $z$  es la elevación del punto por sobre la referencia,  $\psi$  la succión matricial,  $k(\psi)_z$  la función de permeabilidad y  $C(\psi)$  la capacidad de humedad específica.

Con los códigos de cálculo presentados, se realizaron simulaciones numéricas de ensayos de infiltración, y de esta forma se definieron los parámetros característicos del modelo. En todos los casos, la carga hidráulica en superficie,  $h_s$ , se consideró constante e igual a 3,5 cm de columna de agua.

Para resolver la ecuación de flujo en suelos no saturados deben establecerse relaciones para la humedad y permeabilidad del suelo en función de la succión. La relación entre humedad y succión se denomina curva característica suelo-agua y la relación entre permeabilidad y succión se conoce como función de permeabilidad. Un modelo para caracterizar estas relaciones corresponde al propuesto por van Genuchten (1980) y Mualem (1976),

$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (a\psi)^n} \right]^m \quad (2)$$

$$k(\psi) = k \frac{\left\{ 1 - (a\psi)^{mn} \left[ 1 + (a\psi)^n \right]^{-m} \right\}^2}{\left[ 1 + (a\psi)^n \right]^{-0.5m}} \quad (3)$$

donde  $\Theta$  es la humedad volumétrica normalizada, definido por  $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ,  $\theta$  la humedad volumétrica,  $\theta_s$  la humedad volumétrica de saturación,  $\theta_r$  la humedad volumétrica residual,  $k$  la permeabilidad de suelos

saturados y  $n$ ,  $a$ ,  $m = 1 - 1/n$  son constantes.

### SIMULACIÓN DE ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

En la Tabla 1 se presentan los parámetros adoptados en las simulaciones.

Parámetro	Unidad	UNSAT-H		
		II1	IC1	IC2
$w$	%	19,0	18,6	18,9
$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	13,3	17,3	16,8
$\theta_o$	---	0,25	0,33	0,32
$\theta_s$	---	0,50	0,35	0,37
$\theta_r$	---	0,10	0,12	0,11
$a$	cm <sup>-1</sup>	0,0045	0,002	0,002
$n$	---	2,20	1,45	1,45
$\psi_i$	cm	450	250	690

Referencias: II1 = limo inalterado, IC1 = limo compactado 100% Proctor Estándar, IC2 = limo compactado 80% Proctor Estándar,  $\psi_i$  = succión inicial en el suelo,  $\theta_o$  = humedad volumétrica inicial,  $w$  = humedad gravimétrica inicial,  $a$  y  $n$  parámetros de van Genuchten (1980) Mualem (1976).

Tabla 1: Parámetros del modelo de infiltración para calibrar datos experimentales

Los parámetros de los modelos de infiltración (Tabla 1), se definieron a partir de calibrar los resultados numéricos a los datos experimentales. En la calibración se consideró un análisis de sensibilidad del parámetro de permeabilidad, el cual influye de manera considerable en los resultados numéricos. Los resultados de las simulaciones numéricas se presentan junto con los datos experimentales. La Fig. 4 muestra los resultados obtenidos para el limo natural o inalterado. En esta figura se presenta un análisis de sensibilidad del parámetro de permeabilidad,  $k$ , para el modelo UNSAT-H. El valor seleccionado como parámetro del suelo inalterado ( $k = 1,2 \times 10^{-7}$  m/s), corresponde a un valor de ajuste al tramo central de la curva. Los resultados numéricos muestran un buen ajuste a los datos experimentales en el tramo inicial de la curva, luego el modelo subestima el valor de infiltración, hasta llegar a igualarse para un tiempo aproximado de 2 horas. Finalmente, la tendencia en largo plazo muestra una ligera sobrestimación de los resultados numéricos.

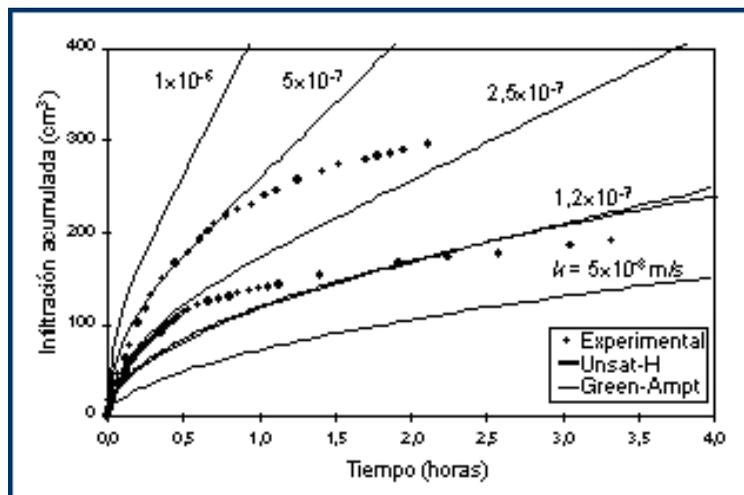


Fig.4: Resultados numéricos y experimentales en la curva de infiltración de limo inalterado

La Fig. 5 muestra los resultados obtenidos para el suelo limoso compactado a humedad próxima a la óptima y 100%PE. En la curva de infiltración, se observa que los resultados de las simulaciones numéricas presentan un buen ajuste a los datos experimentales, tanto a corto como a largo plazo.

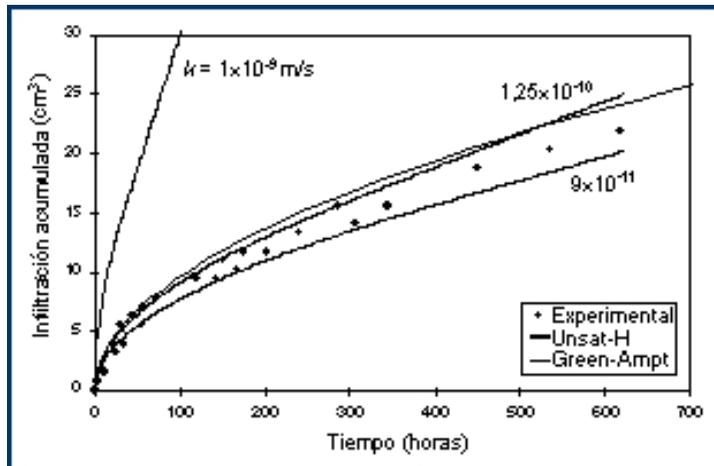


Fig.5: Resultados numéricos y experimental en la curva de infiltración de limo compactado (100% Proctor Estándar)

La Fig. 6 muestra los resultados obtenidos para el suelo limoso compactado a humedad óptima y 80%PE. En la curva de infiltración, en general, se observa un buen ajuste de los resultados numéricos a los datos experimentales.

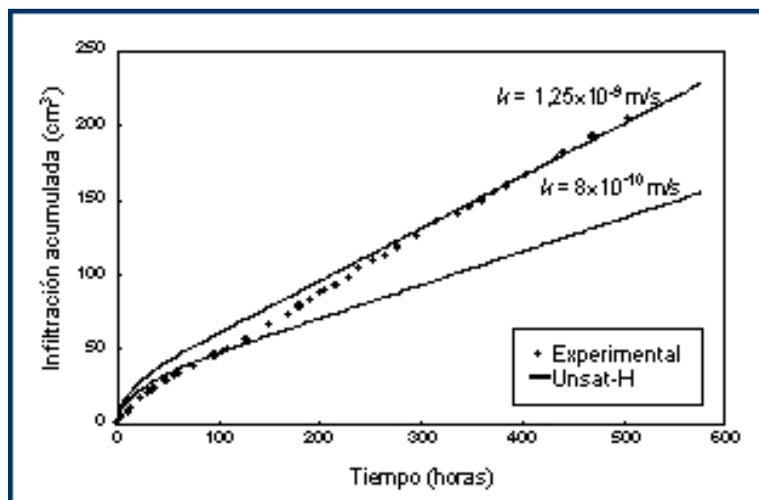


Fig.6: Resultados numéricos y experimental en la curva de infiltración de limo compactado (80% Proctor Estándar)

### MODELO DE ASENTAMIENTO

Con el objetivo de evaluar el asentamiento generado por los procesos de infiltración, se implementó numéricamente el modelo elastoplástico propuesto por Alonso *et al.* (1990). Este modelo, emplea dos variables de tensiones independientes designadas como tensión neta y succión. La implementación del modelo demanda la necesidad de conocer la tensión de fluencia para diferentes niveles de succión, y de esta forma definir la curva de fluencia denominada LC. Las ecuaciones básicas del modelo, correspondientes a la curva LC y las relaciones constitutivas, son,

$$p_o = (p_o^* - p^c) + p^c [(1 - m) \exp(-as) + m] \tag{4}$$

donde  $p_o$  es la tensión de fluencia a succión  $s$ ,  $p^c$  la tensión de referencia,  $p_o^*$  la tensión de fluencia saturada y  $m$  y  $a$  son las variables que deben ser calibradas para cada tipo de suelo.

$$\begin{cases} \text{si } \sigma < p_o & \varepsilon = \kappa \log\left(\frac{\sigma}{p^c}\right) \\ \text{si } \sigma > p_o & \varepsilon = \kappa \log\left(\frac{p_o}{p^c}\right) + \lambda \log\left(\frac{\sigma}{p_o}\right) + \varepsilon_r \end{cases} \quad (5)$$

donde  $\sigma$  es la tensión vertical,  $\varepsilon$  la deformación relativa,  $\kappa$  la pendiente del tramo elástico en proceso de carga,  $\lambda$  la pendiente del tramo elástoplástico en carga y  $\varepsilon_r$  la deformación relativa de referencia inicial.

El modelo elástoplástico, se ha implementado mediante una familia de funciones bilineales para la relación entre deformación y tensión, en escala lineal y logarítmica (de base 10) respectivamente, con diferentes niveles de succión. De esta forma, se calibraron los parámetros del modelo a resultados experimentales obtenidos mediante ensayos de compresión confinada realizados bajo diferentes condiciones de humedad, conservada constante durante el ensayo, tanto en muestras de suelo inalterado como compactado (Figs. 7 y 8).

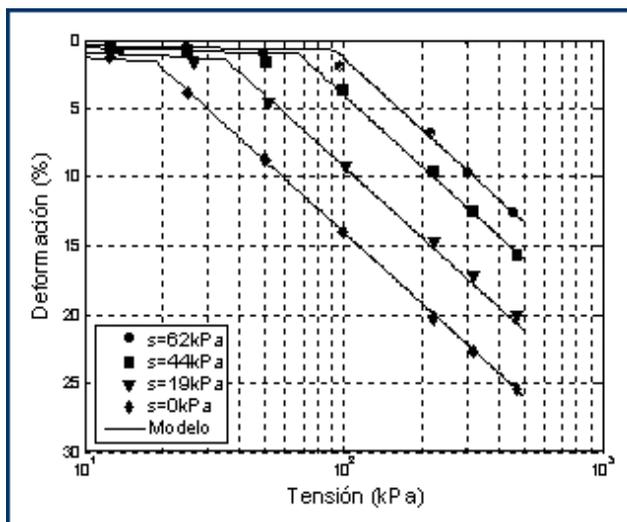


Fig. 7: Ajuste del modelo elástoplástico a resultados experimentales en suelo limoso inalterado

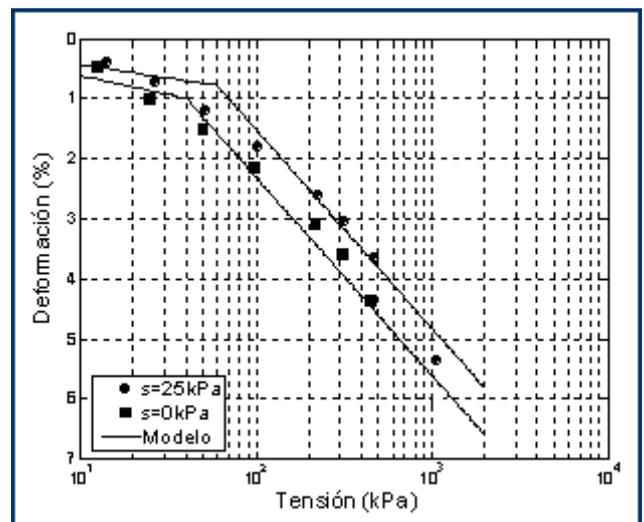


Fig. 8: Ajuste del modelo elástoplástico a resultados experimentales en suelo limoso compactado

## MODELO PROPUESTO PARA LA EVALUACIÓN DE BARRERAS DE SUELO COMPACTADO

El mecanismo de cálculo desarrollado comprende dos pasos. (1) Se evalúa el proceso de infiltración y se obtiene como resultado la curva de infiltración y perfiles de contenidos de humedad transitorios. Para obtener estos resultados, se implementan códigos de ingreso para el programa UNSAT-H. (2) Se calculan los asentamientos por colapso mediante el empleo de los modelos propuestos implementado en un algoritmo de cálculo computacional. Los archivos de salida que genera UNSAT-H para el perfil de humedad, son leídos por el código de asentamientos, de forma que el cálculo resulta simultáneo. En este análisis se ha considerado como tiempo final la condición de flujo estacionario, no obstante podría adoptarse cualquier tiempo de interés. De esta forma, el modelo combinado resuelve el problema de asentamiento para un solo incremento de humedad. En el cálculo se considera la condición inicial de equilibrio y la condición final estacionaria. La Fig. 9 presenta un diagrama de flujo que representa el programa de cálculo descrito. La secuencia indica la forma de computar infiltraciones en el sistema, y posteriormente calcular los asentamientos por colapso.

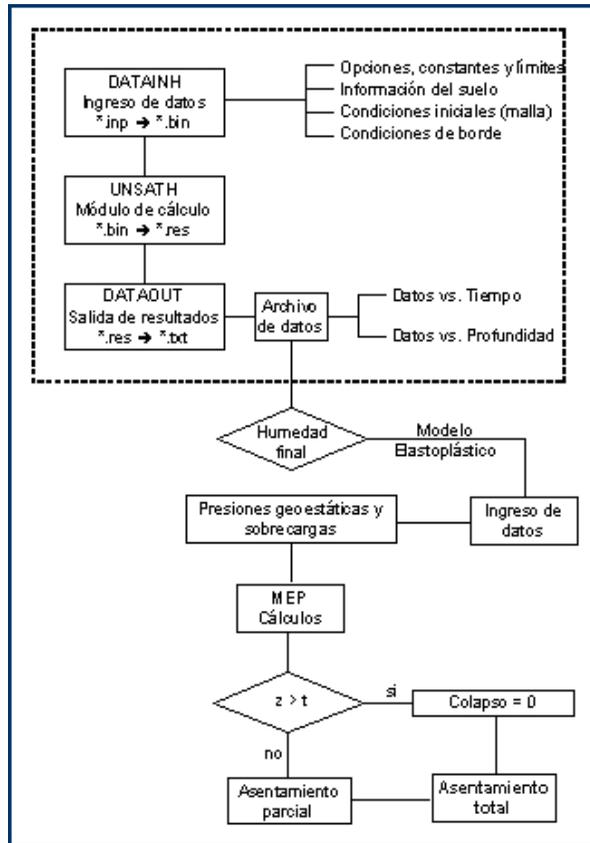


Fig. 9: Diagrama de flujo del programa de cálculo combinado infiltración-asetamiento

### APLICACIÓN DEL MODELO

Para identificar las variables de mayor trascendencia en el desempeño de los sistemas de barreras, y formular recomendaciones de diseño y construcción, se plantean diferentes escenarios de análisis básicos (Tabla 2). En la Fig. 10 se presenta un esquema general del sistema y se indican los diferentes elementos componentes.

	Variable	L (m)	h (m)	Condición
A	Espesor de barrera	0,2	10	C1
		0,5		
		1,0		
		1,5		
B	Profundidad de nivel freático	1,0	5	C1
			10	
			20	
C	Condición de compactación	1,0	10	C1
				C2

Referencias: C1= compactación a humedad óptima y 100%PE, C2= compactación a humedad óptima y 80%PE. Profundidad de nivel freático definido desde extremo superior de barrera.

Tabla 2: Escenarios

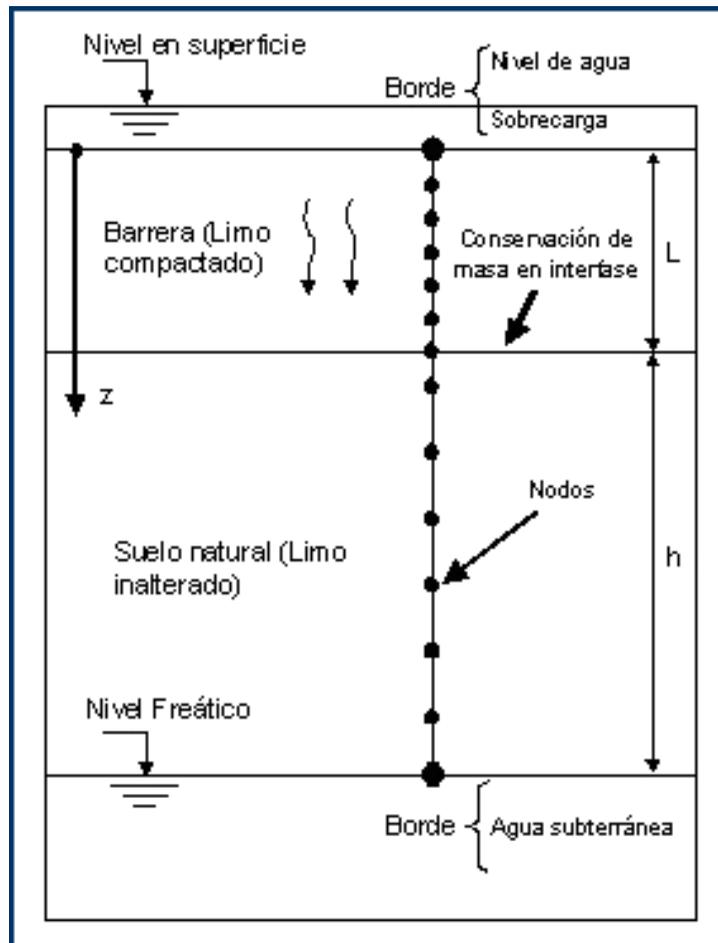


Fig. 10: Sistema de análisis de comportamiento de barreras en loess

En el sistema se han incluido: barrera de suelo compactado, estrato de suelo natural colapsable (*loess*), nivel freático y la condición de contorno superior impuesta de nivel de agua constante en superficie para todos los escenarios. En resumen, en el análisis se estudia la influencia del espesor de barrera de suelo compactado, la profundidad de nivel freático y la energía de compactación.

En la implementación de los modelos, se define una geometría unidimensional constituida por nodos separados una distancia de 0,1 metros en zonas de suelo natural y 0,05 m en el primer tramo de barrera. El sistema analizado corresponde a un perfil de suelo estratificado, por lo que se consideraron dos tipos de suelo para la asignación de materiales en los nodos.

Para las condiciones iniciales, se considera un estado de equilibrio con distribución lineal de succión en profundidad. A partir de esta condición inicial impuesta, el programa computa el estado de humedad inicial a través de la relación succión-humedad definida. Para este análisis se adoptaron las relaciones succión-humedad y succión-permeabilidad de van Genuchten (1980) Mualem (1976).

En la definición de condiciones de contorno, se establecieron condiciones de carga constante tanto en el nodo superior como inferior. En el nodo superior, se asume una carga de agua constante en superficie de 3 kPa (0,30 metros), debido a que corresponde a la carga máxima aceptable en diseño de barreras (Qian *et al.*, 2004). El nodo inferior se considera fijo, con valor de succión nulo, ya que en todos los casos corresponde al nivel freático.

Las simulaciones en UNSAT-H se efectuaron con incrementos temporales de 1 día, y se evaluaron durante un período total de 5 años, tiempo en el que se evidencia proximidad a la condición de flujo estacionario y por lo tanto los perfiles de humedad tienden a conservarse constantes en el tiempo.

La evaluación de asentamientos se realiza en un paso correspondiente al salto desde el perfil de humedad inicial hasta la condición estacionaria. Los parámetros adoptados para las simulaciones de los sistemas de barreras simples compactadas se presentan en la Tabla 3.

	Unid.	UNSAT-H – Modelo de asentamiento		
		LI	LC1	LC2
$\theta_s$	---	0,50	0,35	0,37
$\theta_r$	---	0,10	0,12	0,11
$a$	cm <sup>-1</sup>	0,0045	0,002	0,002
$n$	---	2,20	1,45	1,45
$\psi_i$	cm	variable	250	690
$k$	m/s	$5,5 \times 10^{-7}$	$8,4 \times 10^{-10}$	$1,3 \times 10^{-8}$
$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	12,3	17,2	16,6
$w$	%	17,3	18,6	18,9

Tabla 3: Parámetros adoptados para modelarlos sistemas de barrera

### RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE INFILTRACIÓN

Las curvas de infiltración obtenidas para diferentes espesores de barrera (escenario A) se presentan en la Fig. 11. Los resultados obtenidos muestran que se tiene un incremento en la capacidad de retención de líquidos en el sistema a medida que se incrementa el espesor de la barrera.

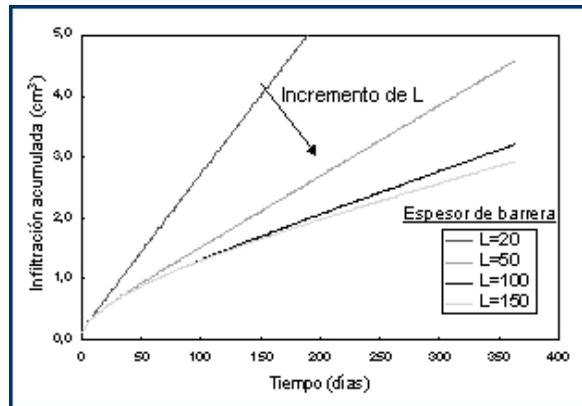


Fig. 11: Curva de infiltración para diferentes espesores de barrera de limo compactado (Escenario A)

En el escenario B se evaluó la influencia de la profundidad del nivel freático. Para esto se adoptó un espesor de barrera constante e igual a 1,0 metro, y condición de compactación a humedad óptima a 100%PE. Las modificaciones en la profundidad del nivel freático, significaron desplazamientos del contorno inferior del modelo, conservando su valor constante de carga hidráulica nula en este borde. Los resultados obtenidos muestran una baja influencia de esta variable en la curva de infiltración (Fig. 12). Se observa que las curvas a 5 metros y 10 metros de profundidad se confunden en la figura.

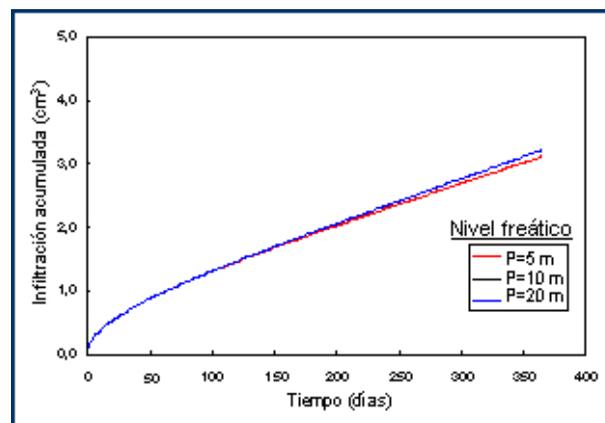


Fig. 12: Curva de infiltración para diferentes profundidades de nivel freático (Escenario B)

La influencia de la energía de compactación se consideró en el escenario C. Aquí se adoptaron constantes el espesor de barrera y la profundidad de nivel freático, iguales a 1,0 metro y 10,0 metros respectivamente, y se consideraron en el análisis dos energías de compactación correspondientes al 100% PE y 80% PE, en ambos casos a humedad óptima. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 13. Se observa una marcada influencia de esta variable en el comportamiento a infiltración del sistema.

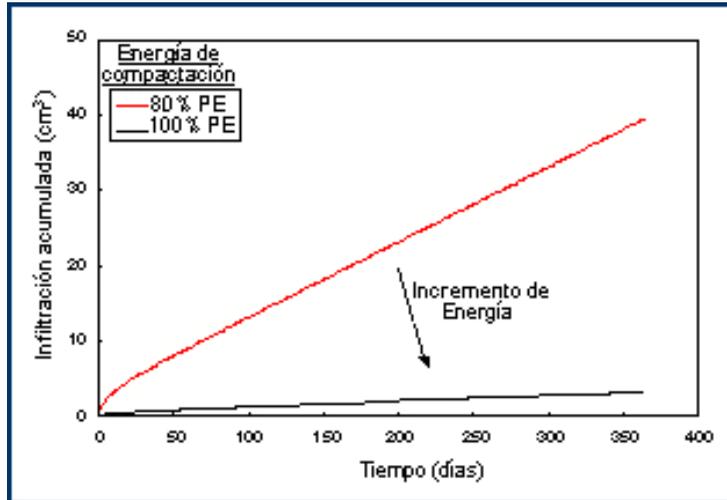


Fig.13: Curva de infiltración para diferentes energías de compactación del suelo (Escenario C)

Junto con las curvas de infiltración, se obtuvieron simulaciones del avance del perfil de humedad. La Fig. 14 muestra los resultados obtenidos para una situación sin barrera, con todo el perfil de suelo equivalente a suelo natural, y profundidad de nivel freático a 10 metros. En esta situación, se observa que en un período de 50 días el flujo tiene lugar en estado estacionario y próximo a la saturación.

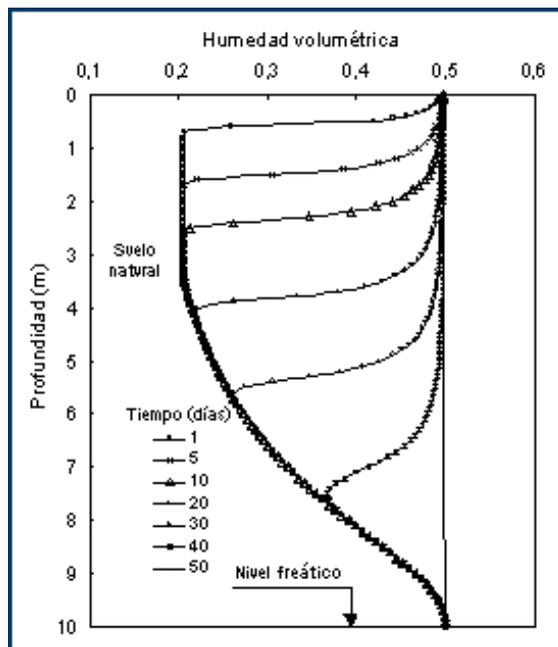


Fig.14: Perfil de humedad para el sistema de análisis sin barrera

La Fig. 15 muestra los perfiles de humedad para barreras de 0,50 metros. Se observan importantes incrementos en los tiempos necesarios para alcanzar la condición de flujo estacionario, respecto de la condición sin barrera. Por otro lado, la instalación de la barrera reduce considerablemente el caudal unitario de agua infiltrada hacia el estrato de suelo natural, por lo que el flujo se produce en el suelo no saturado.

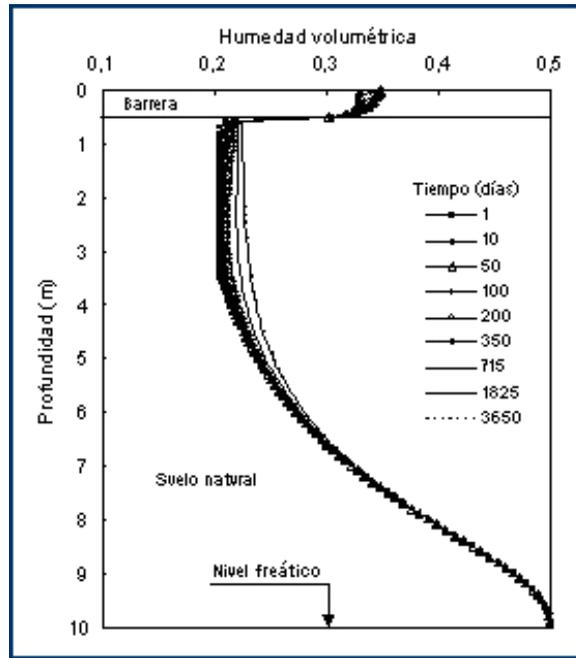


Fig.15: Perfil de humedad (barrera de 0,50 metros)

Los resultados obtenidos de las simulaciones de infiltración, constituyen un elemento clave para la evaluación de los asentamientos. La evaluación conjunta del sistema en infiltración y asentamiento permitirá establecer criterios adecuados de diseño basado en el desempeño de los mismos.

### RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE ASENTAMIENTO

Con los resultados de infiltración obtenidos, se evaluaron los asentamientos por colapso para los escenarios planteados (A, B y C). Los cálculos se han realizado en un paso, desde el estado de humedad inicial hasta el final de condición estacionaria. Las barreras, durante su vida útil, recibirán incrementos de carga a consecuencia de la disposición periódica de residuos dentro de la celda, debido a esto se han considerado diferentes niveles de sobrecarga (0 a 200 kPa) aplicada sobre la superficie de barrera.

En la Fig. 16 se presenta la influencia del espesor de barrera para diferentes niveles de sobre-carga (SC). Los resultados muestran que los incrementos en el espesor de barrera reducen los asentamientos calculados. Esta tendencia se mantiene para todos los niveles de sobrecarga estudiados. La reducción en asentamientos con incrementos en el espesor de barrera adopta una tendencia asintótica, y los mismos se tornan constantes a partir de espesores de barrera de 1,0 metro aproximadamente. A partir de este límite, no se observan reducciones significativas.

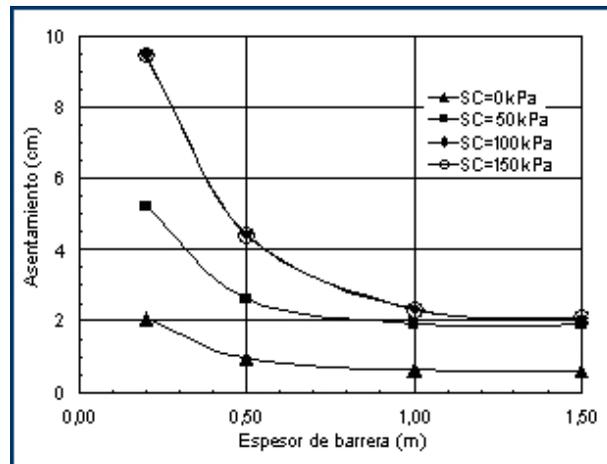


Fig.16: Influencia de espesor de barrera compactada en los asentamientos calculados

Por otro lado, la Fig. 16 muestra que los asentamientos se incrementan con las sobrecargas hasta valores límites de 100 kPa aproximadamente. A partir de aquí, incrementos en la sobrecarga no provocan modificaciones significativas en los resultados. Se observa también que la sobrecarga presenta mayor influencia con menores espesores de barrera. Al incrementarse el espesor de la barrera, se disminuyen los incrementos de asentamientos por incrementos en la sobrecarga.

Por otro lado, se estudió la influencia de la profundidad del nivel freático (Fig. 17). Los resultados muestran los asentamientos calculados para diferentes niveles de sobrecarga en superficie y diferentes profundidades de nivel freático (NF).

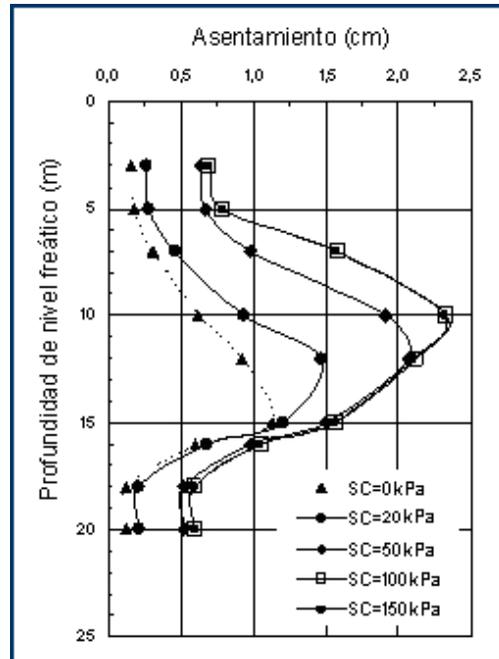


Fig.17: Influencia de la profundidad de nivel freático en los asentamientos calculados

En todos los casos (Fig. 17), se observa una variación con forma de campana invertida, donde los asentamientos crecen hasta un valor máximo, y posteriormente disminuyen con incrementos en la profundidad de NF. Este máximo se desplaza hacia arriba, o menores profundidades de NF, cuando se incrementa la sobrecarga en superficie. Este comportamiento es de particular interés, debido a que permite observar que para cada condición del sistema, existe una profundidad de NF crítica para la cual los asentamientos estimados son máximos.

Finalmente, se estudió la influencia de las condiciones de compactación. Los resultados obtenidos muestran un considerable aumento en los asentamientos estimados al degradar las condiciones de compactación de 100% PE a 80% PE (Fig. 18). La diferencia se torna constante para sobrecargas superiores a 100 kPa.

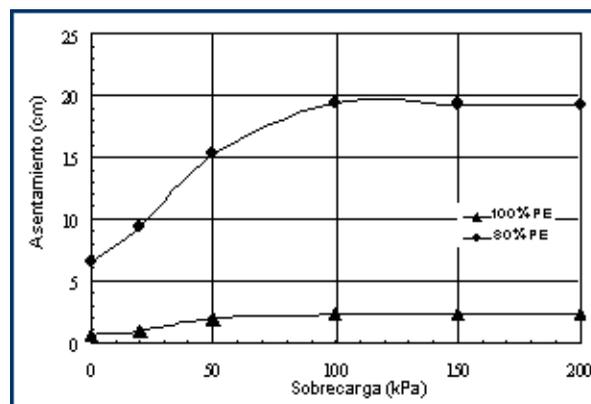


Fig.18: Influencia de la energía de compactación en los asentamientos calculados

### REGULACIONES DE DISEÑO

El diseño de sistemas de barreras para depósitos se basa en estándares prescriptos o estándares de desempeño. La mayoría de las regulaciones actuales pertenecen al tipo de diseño a partir de estándares prescriptos. Sólo algunos países, como Canadá y Estados Unidos, han introducido estándares de desempeño como una alternativa para los requerimientos mínimos en los sistemas de barrera (Manassero *et al.*, 2000). La Fig. 19 resume las especificaciones de diseño básicas planteadas en Europa y Estados Unidos.

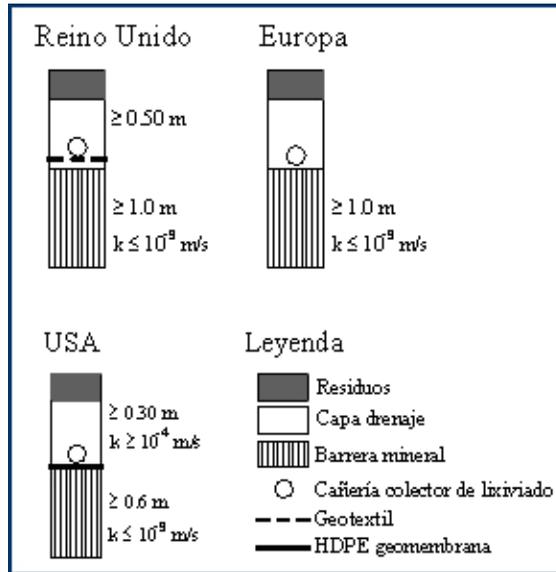


Fig. 19: Requisitos de diseño para barreras de residuos sólidos municipales

Sobre la base de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se sugieren algunas recomendaciones para el diseño de barreras instaladas dentro del área de la llanura pampeana de la Provincia de Córdoba (Fig. 20). En este sentido, se proponen un espesor mínimo de barrera, una permeabilidad máxima y condiciones de compactación mínimas establecidas en función del peso unitario seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ), la humedad de compactación óptima ( $w_{opt}$ ) y el porcentaje de compactación relativa,  $CR$ . También se presentan especificaciones para el drenaje, referidas a espesor de la capa de material granular (LD) y permeabilidad mínima.

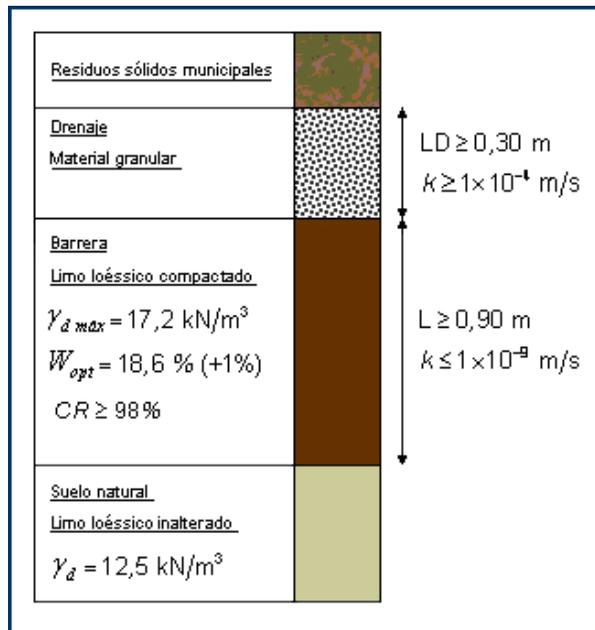


Fig. 20: Recomendaciones de diseño para barreras instaladas en loess

Las recomendaciones presentadas en la Fig. 20, procuran establecer criterios de diseño mínimos a cumplir en la construcción de barreras de vertederos de residuos sólidos municipales pertenecientes a pequeños y medianos municipios localizados en la Provincia de Córdoba, de forma de lograr un impacto ambiental reducido. Estas especificaciones son generales y deberán completarse con recomendaciones particulares dependientes del sector de emplazamiento del vertedero.

En el caso de residuos industriales o peligrosos deben efectuarse investigaciones adicionales para formular recomendaciones de diseño. En general, resultan sistemas más complejos que los sistemas simples de barrera compactada.

### CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se ha presentado e implementado un modelo de infiltración-asentamiento, aplicable al análisis de perfiles de suelo estratificados en condición de flujo no saturado. Para el análisis de infiltración se ha planteado un modelo transitorio no saturado. Para este modelo, se han determinado los parámetros característicos del suelo en estudio, correspondiente al limo loésico inalterado y compactado bajo diferentes condiciones, mediante la simulación de ensayos de laboratorio y calibración a resultados experimentales. Las simulaciones permitieron obtener resultados referidos a la curva de infiltración, o infiltración acumulada en el tiempo, y avance del perfil de humedad.

Se propone un modelo de deformación por colapso, a partir del modelo elastoplástico. En este modelo se contempla la posibilidad de analizar asentamientos en suelos estratificados de cualquier profundidad, con espesores arbitrarios de suelo colapsables, para condiciones iniciales y finales de humedad variables a lo largo del perfil de suelo, y con la posibilidad de incorporar sobre-cargas en la superficie del perfil.

Se ha presentado un análisis del comportamiento de barreras instaladas en *loess*, mediante la aplicación de los modelos desarrollados. Se plantean diferentes escenarios de análisis, y se simula el comportamiento de los sistemas de barrera a infiltración y colapso. En el análisis, se evalúa la influencia del espesor de barrera, profundidad de nivel freático y energía de compactación.

### CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que la posición del nivel freático ejerce una influencia particular sobre los asentamientos. Se observa una variación en forma de campana invertida, donde se obtiene un asentamiento máximo, para una profundidad específica del nivel freático.

El espesor de barrera y la energía de compactación afectan el comportamiento del sistema de manera notable.

La presencia de sobrecargas incrementa los asentamientos. No obstante, luego de la primera aplicación de carga, los incrementos de asentamiento tienden a reducirse.

Se deberá tomar precaución en la definición de espesores mínimos de barrera, y en la especificación de controles de calidad del suelo compactado en campo.

Se formularon recomendaciones de diseño concretas, para la construcción de vertederos controlados, mediante simple compactación de suelo local. Esta solución, constituye una alternativa factible, tanto técnica como económicamente, para reducir la contaminación ambiental generada por la disposición de residuos sólidos urbanos en pequeños y medianos municipios.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la UTN y el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba. Los autores agradecen el apoyo de la Facultad Regional Córdoba y el Departamento de Ingeniería Civil (UTN-FRC).

### REFERENCIAS

Aiassa, G., Zeballos, M. and Terzariol, R., "Regulation and behavior of silty clay liners in Argentina", *Proceeding of the 5th International Congress on Environmental Geotechnics*, Cardiff, Wales, UK, (2006).

Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A., "A constitutive model for partially saturated soils", *Géotechnique*, 40(3): 405-430, (1990).

Benson, C. "Waste containment: strategies & performance", *Australian Geomechanics*. 36(4): 1-26, (2001).



- Benson, C.H. and Daniel, D.E., "Minimum thickness of compacted soil liners: II. Analysis and case histories", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120(1): 153-172, (1994).
- Daniel, D., "Summary review of construction quality control for compacted soil liners", *Waste Containment Systems: Construction, Regulation and Performance*, ASCE, Geotechnical Special Publication 26: 175-189, (1990).
- Daniel, D.E. and Benson, C.H., "Water content-density criteria for compacted soil liners", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 116(12): 1811-1830, (1990).
- Fayer, M.J., "Unsaturated soil water and heat flow model", UNSAT-H, ver. 3.0. U.S. Department of Energy, DE-AC06-76RLO 1830 Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Wash, (2000).
- Manassero, M., Benson, C. and Bouazza, A., "Solid waste containment systems", *Proceedings of GeoEng2000*, Melbourne, Australia. Technomic Publishing Company, Lancaster, PA, USA, 520-642, (2000).
- Meerdink, J.S., Benson, C.H. and Khire, M.V., "Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(7): 565-576, (1996).
- Mualem, Y., "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resources Research*. 12: 593-622, (1976).
- Qian, X., Gray, D.H. and Koerner, R.M., "Estimation of maximum liquid head over landfill barriers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(5): 488-497, (2004).
- Sharma, H.D. and Lewis, S.P., "Waste containment systems, waste stabilization, and landfills. Design and evaluation", John Wiley & Sons, USA, (1994).
- Van Genuchten, M.T., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of American Journal*, 44: 892-898, (1980).
- Wang, X. and Benson, C.H., "Infiltration and saturated hydraulic conductivity of compacted clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121(10): 713-722, (1995).
- Zornberg, J.G. and Christopher, B.R., "Geosynthetics", *The Handbook of Groundwater Engineering*, Second edition, CRC Press, (2006).