

MATERIALES DE SUELOS DE YUCATÁN FACTIBLES DE UTILIZARSE COMO CUBIERTA EN SITIOS DE DISPOSICIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS

Roger GONZÁLEZ HERRERA y Ricardo VEGA AZAMAR

Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. Apartado Postal 150. Administración de Correos Urbana 10. Cordemex, 97111, Mérida, Yucatán, México. Correo electrónico: gherrera@tunku.uady.mx

(Recibido octubre 2000, aceptado abril 2002)

Palabras clave: cubierta, disposición de desechos, impacto ambiental, lixiviado, simulación hidrológica

RESUMEN

Se estudiaron materiales de suelos yucatecos para determinar la factibilidad de utilizarlos como cubierta en sitios de disposición final de desechos sólidos, considerando que la capa de cobertura debe soportar la acción de la intemperie: viento y lluvia combinados, así como la erosión ocasionada por los mismos. La cobertura también debe proveer las pendientes necesarias para un buen sistema de drenaje y mediante la retención temporal de humedad, facilitar la evaporación del agua pluvial acumulada sobre las celdas de basura. Los resultados de este estudio indican que el empleo de una mezcla en volumen de 65 % sahcab y 35 % kancab (arcilla regional) como cubierta y barrera en un sitio de disposición final de desechos sólidos, reduciría en más de la tercera parte la cantidad de lixiviado que produciría un sitio ubicado en la ciudad de Mérida, Yucatán, México u otro lugar con condiciones similares, según simulaciones efectuadas por medio de un modelo que lo evalúa hidrológicamente.

Key words: cover, waste disposal, environmental impact, leachate, hydrologic simulation

ABSTRACT

Soil materials from Yucatan soils were studied to establish the feasibility to use them as cover in solid waste disposal sites, considering that the cover layer must withstand the weathering caused by wind and precipitation. The cover must also provide the slope needed for a good surface drainage system and ease the evaporation of accumulated precipitation on the top of waste cells through temporary moisture retention. Results indicate that a mixture of 65 % sahcab and 35 % kancab (yucatecan clay), by volume, as cover and liner in a waste disposal site, would reduce leachate amount in more than one third of that produced in a site located in Merida, Yucatan, Mexico or any other place with similar conditions, as determined simulating the site using a hydrologic computer model.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de proteger el ambiente y cumplir con los reglamentos ecológicos gubernamentales (Diario Oficial de la Federación, 1996) han propiciado la instalación

de sistemas de capas de recubrimiento en los sitios destinados a la disposición final de residuos. El objetivo del recubrimiento es limitar el movimiento del lixiviado, a través de las celdas de que consta el confinamiento y evitar su posterior percolación hacia el subsuelo.

La cobertura diaria de los desechos sólidos tiene una doble finalidad, por un lado disminuye la entrada de agua pluvial a los estratos de desechos por efecto de la retención temporal de humedad, lo que facilita la evaporación, y en menor medida por los escurrimientos de agua hacia fuera de la celda; esto trae aparejada una reducción en la cantidad de lixiviado a generar y, en consecuencia, en la posibilidad de contaminación al manto de aguas subterráneas. Por otra parte, el material de cobertura impide que los desechos sirvan como guarida y sustento para el desarrollo de fauna nociva y aves, aspectos que han sido tradicionalmente problemáticos en sitios mal operados.

Debe diferenciarse a la cobertura diaria de la cubierta final. La primera es en realidad un recubrimiento o barrera de material natural, que algunas veces puede ser la capa superior de las celdas de basura y otras puede ser una capa intermedia entre dos bloques de desechos sólidos compactados. La cubierta final es la capa de suelo natural que se aplica una vez que se deja de operar el sitio; generalmente es tierra cultivable en la que se pueden sembrar plantas y árboles. Independientemente del tipo de cobertura, la más adecuada para un sitio de disposición final debe seleccionarse considerando dos criterios importantes: el técnico y el económico (Manea *et al.*, 1998; Monteiro y Jucá, 1998).

Desde el punto de vista técnico, el mejor material será aquel que tenga el valor de conductividad hidráulica más bajo posible, que presente plasticidad adecuada para su manejo al compactarse y, además, que evite la creación de túneles por los roedores; en el caso de sitios de disposición con aprovechamiento de biogas, el material debe minimizar igualmente la salida del gas hacia la atmósfera (Delta Ingeniería Ambiental e Ingeniería Ambiental de México 1995).

La arcilla compactada se ha utilizado tradicionalmente como cubierta en la parte superior de las celdas en los sitios de disposición para aislar los residuos de la intemperie; esto se debe principalmente a su baja conductividad hidráulica y a la gran disponibilidad que se tiene de ella en muchos lugares. Sin embargo, algunas veces su alta plasticidad puede dificultar su colocación y compactación y su grado de contracción-dilatación puede conducir a un agrietamiento que podría afectar la calidad del sitio.

El objetivo principal de este estudio es identificar el material que logre alcanzar una conductividad hidráulica en el campo que satisfaga las normas oficiales mexicanas y los criterios mínimos para asegurar una protección al medio que rodea los sitios de disposición de desechos. Para cumplir con lo anterior, se llevó a cabo una simulación utilizando como herramienta un modelo hidrológico que reporta la cantidad de líquido percolado a través de las celdas de desecho en un sitio de disposición lo que redundaría en la contaminación del subsuelo.

MATERIALES ESTUDIADOS

Los materiales estudiados pertenecen a los principales grupos que se presentan en la región: la coracal, del grupo de las gravas; el sahcab, que está presente con mayor abundancia en el estado de Yucatán, correspondiente a las gravas y arenas; el kancab, del grupo de las arcillas predominantes en el cono sur del estado; se estudió también el utilizado en el ex-basurero municipal de la ciudad de Mérida, Yucatán.

Coracal

Es el desperdicio que se obtiene durante el proceso de elaboración de la cal viva. Parte de este proceso es la calcinación y la trituración de la roca, la cual se criba posteriormente; la parte que pasa la malla forma lo que será la cal y la que queda retenida la conforman las partículas de desperdicio que no logran calcinarse, a las que se denomina coracal.

Sahcab

En Yucatán, ningún banco de material es comparable en magnitud con los del sahcab, vocablo maya que significa “tierra blanca”; en gran número de cortes de caminos, canteras y otras excavaciones se observa este substrato desmenuzable, blanquecino, que es una roca calcárea no consolidada, cuya consistencia parece indicar que el lodo calcáreo del cual procede se depositó como calcita y, por lo tanto, no ocurrió la recristalización de aragonita a calcita, proceso necesario para la consolidación de la roca. También se les denomina sahcab a algunas calizas y coquinas cretáceas de consistencia análoga a la mencionada. El espesor del sahcab usualmente observado es de 2 a 4 metros, siendo en ocasiones menor o mayor. Cuando se le encuentra, subyace a la capa superficial de la caliza compacta, descansando sobre caliza suave. En algunos sitios aparece interestratificado con capas delgadas de caliza; en otras localidades aflora en la superficie, como ocurre en una vasta región del sureste de la península de Yucatán (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos 1972).

Kancab

El término kancab (vocablo maya para “tierra roja o amarillenta”) designa al grupo de materiales de color rojizo que se presenta generalmente en el cono sur del estado y al que también localmente se designa como arcilla. Los bancos de kancab no son ni tan abundantes ni tan extensos como lo son los de sahcab en la península de Yucatán.

Material del ex-basurero

Con este nombre se designó al material proveniente del exbasurero municipal de Mérida. Se le localiza en

montículos en las zonas aledañas al sitio; está altamente contaminado con materia orgánica e inorgánica, lo cual lo hace inestable y con un comportamiento difícil de predecir y está formado por el terreno natural del sitio y por basura estabilizada.

Mezclas de materiales

Se elaboraron mezclas de los materiales descritos anteriormente para analizar la posibilidad del mejoramiento de sus propiedades originales, de tal manera que se obtenga uno que resulte tanto económicamente factible, como técnicamente aceptable. Las mezclas se realizaron basándose en el volumen, por ser ésta la forma más fácil de manejar los materiales en el sitio de su preparación y colocación. Por ejemplo, una mezcla de sahcab-kancab al 80–20 del volumen indica que el volumen final de la mezcla tendrá 80 % de sahcab y 20 % de kancab.

CONSIDERACIONES DEL ESTUDIO

En general: 1) las propiedades del material utilizado en el exbasurero municipal de la ciudad de Mérida, Yucatán, se estudiaron con el objetivo de conocer las condiciones que prevalecían en el sitio para tener una base de comparación; 2) el sahcab es el material que con mayor abundancia se presenta en los bancos del estado de Yucatán, lo que lo hace prácticamente viable, por lo que constituye la parte dominante de las mezclas estudiadas; 3) el kancab no se presenta en una región tan amplia como el sahcab, por lo que constituye la parte minoritaria de las mezclas; 4) la coracal se estudió como una opción alternativa a los materiales antes mencionados; 5) las mezclas de sahcab con material del exbasurero tuvieron como objeto observar el efecto que este último produce sobre las propiedades del primero; 6) las mezclas de sahcab con kancab se hicieron para determinar el menor contenido de kancab que conjugue los mejores resultados de conductividad hidráulica, plasticidad y contracción.

Específicamente, en el caso del sahcab y el kancab, los objetivos de la mezcla fueron: 1) que la mayor parte del volumen de la mezcla sea de sahcab para hacerla económica y prácticamente factible; 2) que el kancab disminuya notablemente la conductividad hidráulica del sahcab; 3) que las plasticidades, resultado de las mezclas de sahcab y kancab, permitan el fácil manejo de la mezcla óptima; 4) que la baja contracción y el alto valor cementante del sahcab disminuyan los posibles problemas de agrietamiento.

PRINCIPALES PROPIEDADES ESTUDIADAS

De los objetivos, definición, principios de operación y

partes que componen un sitio de disposición final de desechos sólidos se desprenden los principales parámetros a considerar, desde el punto de vista técnico, en un material que ha de ser utilizado como cubierta diaria; estos parámetros son: la granulometría; los límites de Atterberg, que son medidas de la manejabilidad del material y de la posibilidad de agrietamiento o resquebrajamiento del mismo; la clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); el peso volumétrico; la densidad de los sólidos (gravedad específica); la porosidad y la conductividad hidráulica. Esta última es un indicador de la facilidad con que fluye el agua a través de las capas de cubierta del sitio de disposición.

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, siguiendo de cerca las especificaciones de la AASHTO (1974), de la ASTM (1981) y el Instructivo para Ensayo de Suelos de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (1967). Los resultados se resumen en las tablas que se presentan en los apartados que siguen.

COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS

El comportamiento de los materiales, así como de las mezclas de sahcab con kancab y las de sahcab con material del ex-basurero de la ciudad de Mérida, se presenta a continuación. Cabe hacer notar que aunque se trabajó con mezclas en diversas proporciones, para los diferentes materiales estudiados, únicamente se muestran en las tablas de resultados las que son más representativas para la interpretación de los mismos. Para el caso del material del exbasurero de Mérida, en los resultados que se presentarán posteriormente, con excepción de la granulometría y el peso volumétrico, se debe tener en cuenta que a éste se le sometió a un proceso de cribado con la malla 4.

Análisis granulométrico

Se efectuó el análisis granulométrico (Rosales 1984), obteniendo los resultados que se presentan en la **tabla I**; la tabulación está dada en el porcentaje que pasa la criba.

La muestra de coracal fue colectada en los bancos de materiales de Mitza, ubicados en el kilómetro 17.5 de la carretera Mérida – Progreso, Yucatán; está compuesta principalmente de material grueso, con un contenido de arena de regular a bajo y con poca cantidad de finos. El sahcab fue obtenido en los bancos de materiales de Mitza ubicados en el kilómetro 30 de la carretera Mérida–Progreso, Yucatán. En general, en la región aledaña a la ciudad de Mérida, el sahcab corresponde a una arena-grava de color blanco o blanquecino proveniente de caliza. El kancab utilizado en este estudio fue colectado en

TABLA I. COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS

% QUE PASA LA CRIBA				
	Coracal	Sahcab	Kancab	Material del ex-basurero de Mérida
RETENIDO EN LA CRIBA No. 4				
3"			El 100 % del material pasó por la malla No. 4.	
2"				100.0
1 ½"				99.0
1"				97.7
¾"	100.0			92.0
3/8"	79.0	100.0		79.0
No. 4	35.0	99.0		65.0
PASA LA CRIBA No. 4 (Por lavado)				
Malla No. 10	6.0	96.0	91.0	53.3
Malla No. 20	5.0	87.0	71.0	43.0
Malla No. 40	4.0	79.0	51.0	35.2
Malla No. 60	4.0	73.0	40.0	31.5
Malla No. 100	4.0	62.0	22.0	27.4
Malla No. 200	2.0	47.0	13.0	24.1
OBSERVACIONES				
% Grava	65.0	1.0	0.0	35.0
% Arena	33.0	52.0	87.0	41.0
% Finos	2.0	47.0	13.0	24.0

la localidad de Cacao, ubicada al norte de Muna, Yucatán, distante aproximadamente 64 kilómetros al sur de la ciudad de Mérida; tiene alto contenido de arena y finos. El material del exbasurero de Mérida, presenta un contenido elevado de arena y finos.

Límites de Atterberg

La plasticidad se estudió en función del índice plástico que se obtiene mediante los límites de Atterberg (Rosales 1984). En la **tabla II** se observan los resultados de los materiales originales y algunas mezclas efectuadas.

La coracal mostró escasa a nula plasticidad, por lo que no aparece reportada en la **tabla II**. En general, el índice plástico del sahcab es bajo o nulo pero posee un alto valor cementante. El kancab es de plasticidad considerable y generalmente es moldeable y manejable. Por su granulometría, el material del exbasurero de Mérida manifiesta cierta plasticidad. El comportamiento de las mezclas de materiales puede notarse en las **figuras 1 y 2**. La

figura 1a, muestra que el porcentaje de contracción lineal se incrementa suavemente conforme aumenta el contenido de kancab en las mezclas sahcab-kancab; el índice plástico (**Figura 1b**) se eleva también con la adición de kancab a las mezclas, teniéndose leves incrementos a partir del contenido de 10 % de kancab. Los resultados obtenidos para la mezcla de material del basurero con sahcab presentan cierta consistencia (**Figuras 2a y 2b**). La contracción lineal se incrementa suavemente hasta el 40 % de material del exbasurero, en volumen, a partir de donde se manifiesta un incremento brusco en el gradiente de la curva.

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Este sistema se basa en la granulometría del material, en su plasticidad, o bien en ambas (Juárez y Rico 1974). La clasificación se determina mediante la carta de plasticidad en función del límite líquido y del índice plástico cuando existe un alto porcentaje de finos o mediante la granulometría, en función del coeficiente de uniformidad

TABLA II. LÍMITES DE ATTERBERG DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS

Material	Límite líquido	Límite plástico	Índice plástico	% contracción lineal
Sahcab (1)	20.55	No presenta	No presenta	0.00
Kancab (2)	53.50	40.50	13.00	10.60
Material del ex-basurero (3)	37.65	19.35	18.30	3.02
Mezcla 90 – 10 de (1) y (2)	22.48	17.97	4.51	1.75
Mezcla 80 – 20 de (1) y (2)	24.00	18.50	5.50	2.44
Mezcla 70 – 30 de (1) y (2)	26.30	19.60	6.70	3.90
Mezcla 65 – 35 de (1) y (2)	28.54	21.18	7.36	4.26
Mezcla 60 – 40 de (1) y (2)	30.78	22.76	8.02	4.61
Mezcla 67 – 33 de (1) y (3)	23.55	21.56	1.99	0.60
Mezcla 50 – 50 de (1) y (3)	27.52	24.96	2.56	1.00

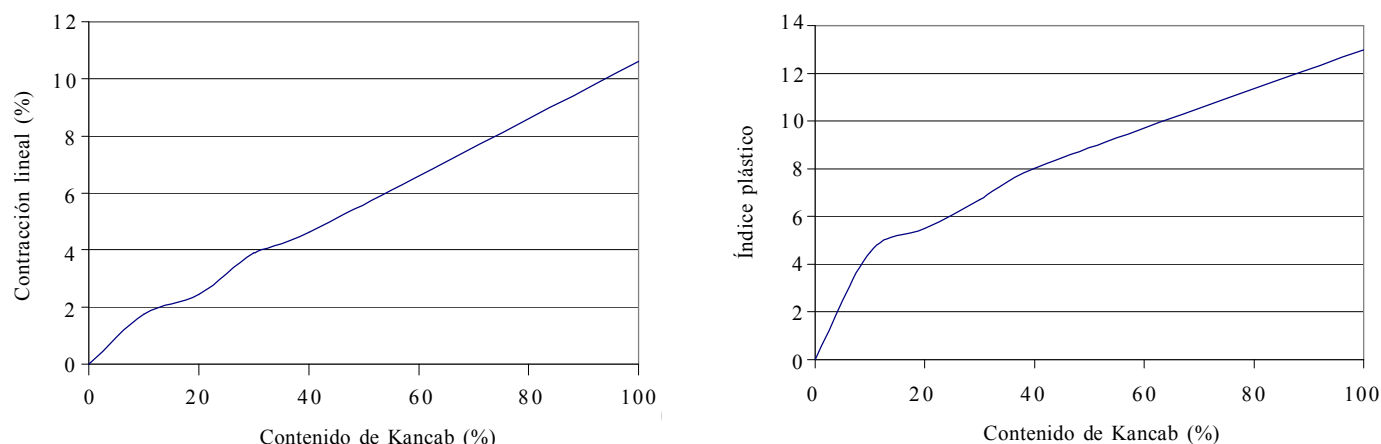


Fig. 1. Comportamiento de las mezclas sahcab – kancab. a) Porcentaje de contracción lineal en función de la cantidad de kancab (en volumen) en la mezcla. b) Índice plástico en función de la cantidad de kancab (en volumen) en la mezcla

(Cu) y del coeficiente de curvatura (Cc). Los resultados de las determinaciones se presentan en la **tabla III**.

El único material que tuvo un bajo porcentaje de finos fue la coracal (**ver Tabla 1**), del que se obtuvo un coeficiente de uniformidad (Cu) igual a 3 y un coeficiente de curvatura (Cc) de 1.4. Entre las diferentes variedades de sahcab se encuentran, según el SUCS, grupos principalmente de arenas y gravas bien o mal graduadas (SW, GW, SP, GP) que no presentan índice plástico y cuya clasificación petrográfica corresponde a creta pulverulenta muy porosa y permeable con gran cantidad de fósiles o coquina blanca porosa. Asimismo, se presentan grupos de arcillas de baja compresibilidad (CL) con índice plástico del orden de 10 que corresponde a creta pulverulenta o a caliza cretosa fosilífera blanda, ambas de color café amarillento y también se presentan grupos de arcilla-limo de baja compresibilidad (CL-ML) con índice plástico aproximadamente de 8, que corres-

ponde a creta o caliza blanca o cretosa con partes duras (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos 1972).

Gravedad específica y porosidad

La densidad de los sólidos se determinó de acuerdo con el método descrito por Rosales (1984), reportando un rango de variación entre 2.4 y 2.7 con valor promedio de 2.57. La porosidad se calculó indirectamente (Juárez y Rico 1974) a partir de los datos obtenidos en la prueba de conductividad hidráulica y gravedad específica de los sólidos. Algunos resultados se presentan en la **tabla IV**. Este parámetro varió entre 30 y 45 % y su valor promedio fue de 39 %, aproximadamente.

Conductividad hidráulica

La determinación de la conductividad hidráulica se realizó mediante el método de carga variable descrito por Bowles (1981). Los resultados se presentan en la

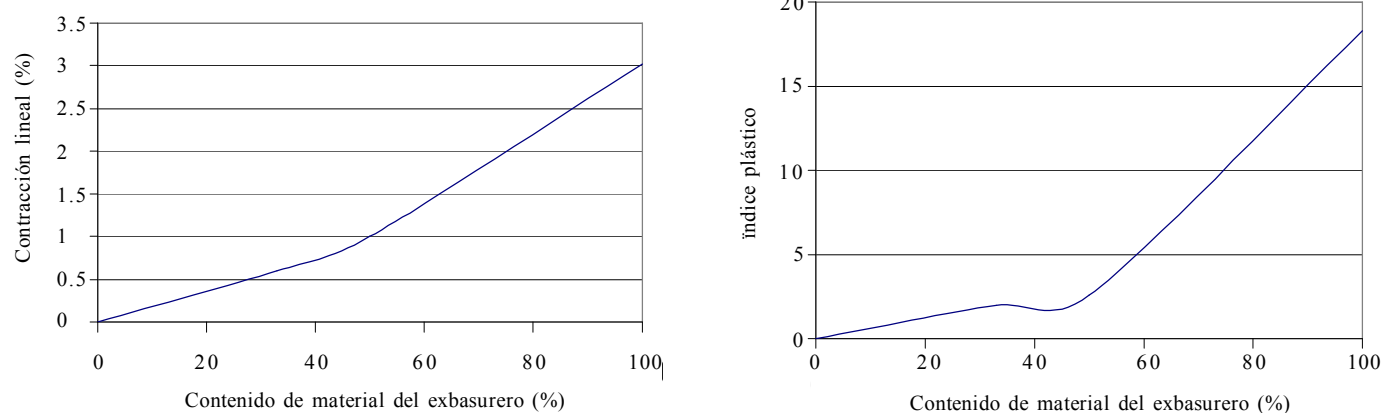


Fig. 2. Comportamiento de las mezclas sahcab – material del exbasurero de Mérida. a) Porcentaje de contracción lineal en función de la cantidad de material actual del basurero (en volumen) de la mezcla. b) Índice plástico en función de la cantidad de material actual del basurero (en volumen) en la mezcla

TABLA III. CLASIFICACIÓN, SEGÚN EL SUCS, DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS

Material	Clasificación
Coracal	GP: Grava mal graduada.
Sahcab (1)	ML: Limo de baja compresibilidad
Kancab (2)	MH: Limo de alta compresibilidad
Material del exbasurero (3)	CL: Arcilla de baja compresibilidad (mucha materia orgánica)
Mezcla 90 - 10 de (1) y (2)	CL - ML: Arcilla - limo de baja compresibilidad
Mezcla 80 - 20 de (1) y (2)	CL - ML: Arcilla - limo de baja compresibilidad
Mezcla 70 - 30 de (1) y (2)	CL - ML: Arcilla - limo de baja compresibilidad
Mezcla 65 - 35 de (1) y (2)	CL - ML: Arcilla - limo de baja compresibilidad
Mezcla 60 - 40 de (1) y (2)	ML: Limo de baja compresibilidad
Mezcla 67 - 33 de (1) y (3)	ML: Limo de baja compresibilidad (con materia orgánica)
Mezcla 50 - 50 de (1) y (3)	ML: Limo de baja compresibilidad (con materia orgánica)

tabla V y tienen un rango de variación entre 10^{-6} y 10^{-3} .

La granulometría de la coracal la hace muy permeable. La alta permeabilidad es la característica general del sahcab. El kancab es de baja conductividad hidráulica (del orden de 10^{-6} a 10^{-5} cm/s) y el material del exbasurero de Mérida tiene una permeabilidad del orden de 10^{-4} cm/s por su parte arenosa y fina.

TABLAIV. DENSIDAD DE LOS SÓLIDOS (S_s) Y POROSIDAD (η) DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS

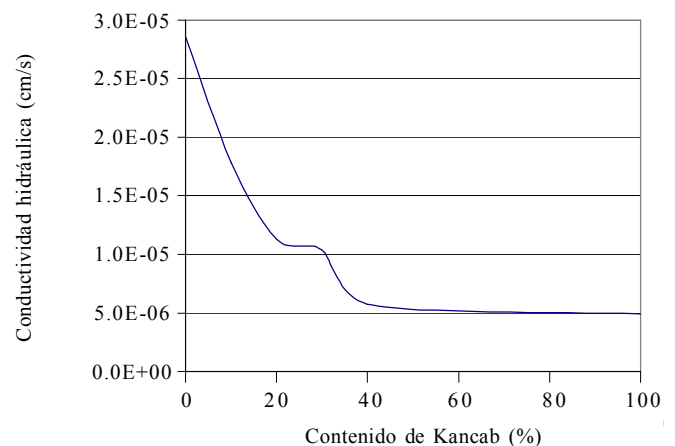
Material	S_s	η (%)
Sahcab (1)	2.490	32.7
Material del exbasurero (3)	2.477	43.1
Mezcla 80 - 20 de (1) y (2)	2.690	39.6
Mezcla 67 - 33 de (1) y (3)	2.571	39.7
Mezcla 50 - 50 de (1) y (3)	2.625	38.6

En la **figura 3** se puede observar que a medida que aumenta el contenido de kancab en las mezclas sahcab-kancab, éstas se hacen menos permeables. La conductividad hidráulica baja notablemente para un contenido de 35% en volumen de kancab en la mezcla y a partir de

TABLA V. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS

Material	K (cm/s)
Sahcab (1)	2.8565×10^{-5}
Kancab (2)	4.946×10^{-6}
Material del exbasurero (3)	1.240×10^{-4}
Mezcla 90 - 10 de (1) y (2)	1.7885×10^{-5}
Mezcla 80 - 20 de (1) y (2)	1.1288×10^{-5}
Mezcla 70 - 30 de (1) y (2)	1.042×10^{-5}
Mezcla 65 - 35 de (1) y (2)	8.1×10^{-6}
Mezcla 60 - 40 de (1) y (2)	5.7906×10^{-6}
Mezcla 67 - 33 de (1) y (3)	3.9681×10^{-5}
Mezcla 50 - 50 de (1) y (3)	3.66×10^{-6}

este punto el descenso es más discreto. De lo anterior se desprende que el contenido de 35 % de kancab (en volumen), balancea la disminución de la conductividad hidráulica con el incremento de la plasticidad, manteniendo un porcentaje de contracción lineal aceptable, en una mezcla sahcab-kancab.

**Fig. 3.** Conductividad hidráulica en función de la cantidad de kancab (en volumen) en la mezcla sahcab-kancab

El comportamiento de la conductividad hidráulica en la mezcla sahcab-material del exbasurero es totalmente errático, que se explica por la naturaleza y la contaminación del material del basurero, que lo hace inestable (ver **Figura 2**).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hay que considerar que el kancab puede ser apto, desde el punto de vista técnico para ser utilizado como cubierta de un sitio de disposición final de desechos, pero desde el punto de vista económico y práctico, podría no

serlo. Por el contrario, el sahcab es apto desde el punto de vista económico y práctico para utilizarse como cubierta, pero desde el punto de vista técnico, podría no serlo.

Las arcillas compactas por lo general no cumplen con las expectativas de buen desempeño en el campo (Daniel, 1998); el objetivo principal de este estudio es identificar el material que logre alcanzar una conductividad hidráulica de 1×10^{-7} cm/s en el campo, para satisfacer las normas oficiales mexicanas y los criterios mínimos para asegurar una protección al medio que rodea a los sitios de disposición de desechos (Diario Oficial de la Federación 1993, 1996).

Benson *et al.* (1994) presentan un estudio realizado en 67 sitios de disposición final de desechos en el cual se evaluaron las diferentes características de los suelos que serían los mejores indicadores del comportamiento hidráulico de los mismos. Todos los sitios en su estudio tenían cubiertas de arcilla natural y el enfoque se concentró en los parámetros relacionados con la composición y estructura de los materiales. Utilizando curvas de análisis granulométrico y límites de Atterberg, se propusieron cinco condiciones necesarias que debe tener un suelo para alcanzar una conductividad hidráulica de 1×10^{-7} cm/s o menor. Las cinco condiciones son que: 1) el porcentaje de finos sea mayor o igual a 30 %; 2) el porcentaje de arena sea mayor o igual a 15 %; 3) el límite líquido sea mayor o igual a 20; 4) el índice de plasticidad sea mayor o igual a 7 y 5) la relación entre 4) y 2) sea mayor o igual a 0.3.

Así, para este caso, la mezcla sahcab-kancab 65-35 satisface todas las condiciones anteriores, lo que hace concluir que tiene el potencial de alcanzar una conductividad hidráulica muy baja (menor o igual a 1×10^{-7} cm/s).

Algunos estudios han demostrado que las pruebas de laboratorio con frecuencia subestiman la conductividad hidráulica de campo (Daniel 1984, Dunn y Palmer 1994, Wallace *et al.* 1994). Esta discrepancia entre valores de campo y laboratorio se atribuye a la presencia de macroporos o a la mala construcción de las juntas. Estos defectos de construcción pueden ser más o menos importantes dependiendo de la calidad de la obra y de un mantenimiento apropiado de las cubiertas. Los macroporos actúan como patrones preferenciales de flujo para el agua; su presencia puede incrementar la conductividad hidráulica hasta cuatro ordenes de magnitud (Comeau *et al.* 1998). Así, las condiciones que se deben cumplir para reducir el desarrollo de los macroporos durante la construcción y el mantenimiento de las cubiertas son las siguientes: 1) utilizar un equipo de compactación apropiado; 2) diseñar el espesor adecuado de cubierta; 3) mantener al material en cuestión con un contenido de humedad óptimo durante la construcción; 4) utilizar una energía de compactación adecuada; 5) tomar las medidas necesarias para controlar y eliminar grandes masas de

material; y 6) proteger adecuadamente las cubiertas, después de la construcción, contra el intemperismo.

SIMULACIÓN DEL PERCOLADO A TRAVÉS DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS

Se aplicó el modelo computacional HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance = Evaluación Hidrológica del Desempeño de un Relleno Sanitario) a un sitio de disposición final utilizando las características climatológicas y el diseño del exbasurero municipal de la ciudad de Mérida, Yucatán, tomado en consideración los parámetros determinados de los materiales estudiados.

El modelo fue elaborado para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Schroeder 1983); es un simulador de los procesos que ocurren en un sitio de disposición final de desechos sólidos. HELP es capaz de predecir, con gran aproximación, entre otras cosas: la cantidad de agua evapotranspirada, la escorrentía y la cantidad de agua que alcanzará a percolar hasta el subsuelo y los cuerpos de agua subterráneos durante un lapso de tiempo definido.

Entre los datos que el modelo requiere para funcionar se encuentran: la información climatológica del lugar donde se ubica el sitio de disposición (precipitación mensual, radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento, humedad), así como las características propias del sitio de disposición (área, espesores de las capas que lo componen, propiedades de los materiales que integran las capas, etc.).

La información climatológica para alimentar el modelo se obtuvo del observatorio meteorológico de la ciudad de Mérida, por contar con los registros completos de los parámetros requeridos. Se capturaron registros diarios originales de datos de temperatura, precipitación, horas de sol, humedad relativa y velocidad del viento para generar una base de datos de entrada para el modelo. Las propiedades de los materiales fueron las determinadas anteriormente. La capacidad de campo y el punto de marchitamiento se obtienen de un listado que brinda el propio programa y se obtiene en función de la conductividad hidráulica, la clasificación SUCS y la porosidad.

La estructura del sitio de disposición utilizada para evaluar los distintos materiales estudiados es la del exbasurero de la ciudad de Mérida, Yucatán, que consiste de dos plataformas de tres metros de altura cada una, cubierta por una capa de material según se presenta en la **figura 4**. Se simuló el comportamiento de los materiales estudiados y las mezclas efectuadas con ellos. Algunos datos de entrada para el modelo así como las propiedades de los desechos sólidos (Schroeder *et al.* 1995) se presentan en la **tabla VI**. Las propiedades de los desechos sólidos son las reportadas por Kú (1998) quien rea-

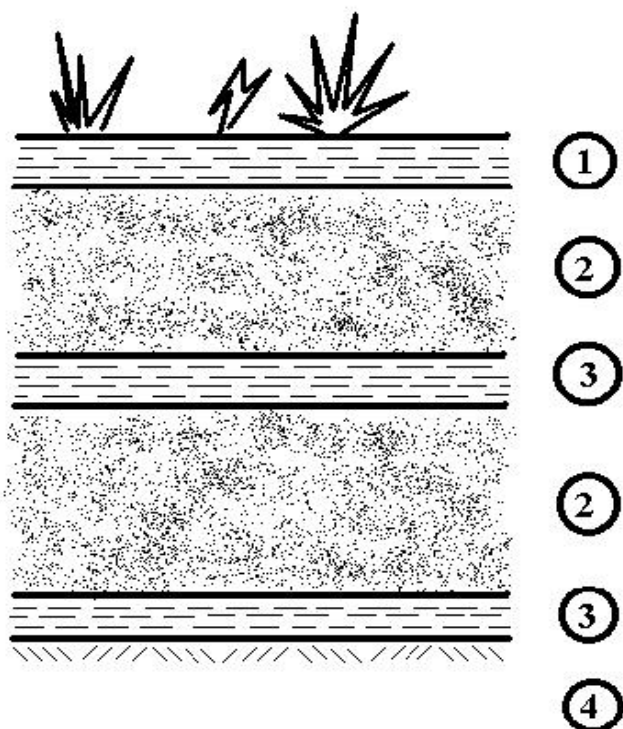


Fig. 4. Perfil del sitio de disposición simulado mediante HELP. 1) Capa superior de percolación rápida de 30 cm de espesor constituida por el material estudiado, compactado. 2) Capa de desechos sólidos compactados, con un espesor de 270 cm. 3) Capa de material estudiado, compactado, de 30 cm de espesor; permite percolación únicamente al saturarse. 4) Terreno natural

lizó las determinaciones siguiendo las normas NOM-AA-22-1985 y NOM-AA-26-1985 descritas por Sauri y Peniche (1993); estas propiedades no variaron en las simulaciones.

La disposición de desechos sólidos aplicando el método de área se utilizó de marzo de 1993 a abril de 1998, fecha en que se cierra el tiradero municipal de Mérida para inaugurar el relleno sanitario (Diario de Yucatán, 1998). Por lo tanto, el lapso de tiempo simulado fue de cinco años. El balance final de HELP arrojó los resultados que se presentan en la **tabla VII**.

De los datos anteriores, el parámetro que más afectaría a la calidad del agua subterránea del sitio de dispo-

sición sería la cantidad de lixiviado que percola en el terreno natural a través del subsuelo. Se concluye entonces que la mínima percolación se obtendrá empleando una cubierta de sahcab-kancab 65-35.

Al comparar los volúmenes de percolación de una cubierta consistente de material del exbasurero, con una compuesta por una mezcla de sahcab-kancab 65-35 se obtiene una reducción de más de 30 % en el percolado.

Por lo tanto, una proporción de alrededor de 35 % de kancab en volumen, en una mezcla sahcab-kancab, es la que conjuga los resultados más aceptables en cuanto a disminución de la conductividad hidráulica ($k = 8.1 \times 10^{-6}$ cm/s) e incremento en la plasticidad (I.P. = 7.36), lo que facilitaría su colocación y compactación en el campo, manteniendo un bajo porcentaje de contracción lineal (4.26 %) minimizando así la posibilidad de agrietamiento.

CONCLUSIONES

Se estudiaron los materiales que pertenecen a los principales grupos que se presentan en la región yucateca que pudieran ser factibles de utilizarse como cubierta diaria en un sitio de disposición final de desechos sólidos; la coracal, del grupo de las gravas; el sahcab, que es el material de mayor abundancia en el estado de Yucatán, del grupo de gravas y arenas; el kancab, del grupo de las arcillas predominantes en el cono sur del estado; se estudiaron también las propiedades del material utilizado en el exbasurero municipal de la ciudad de Mérida.

La coracal es una grava permeable muy uniforme en su granulometría, por lo que su utilización como cubierta diaria en un sitio de disposición, tanto como material único o formando parte de una mezcla, no tendría resultados adecuados.

No se presentaron mejoras cuando se empleó la mezcla de sahcab con material del exbasurero en menor proporción, como cubierta diaria de un sitio de disposición local, por lo que no vale la pena contaminar el sahcab con este tipo de material.

La adición de kancab (arcilla de la región) al sahcab, disminuye la conductividad hidráulica de éste y aumenta su plasticidad. Una proporción de alrededor de 35 % de kancab en volumen en una mezcla sahcab-kancab es la que conjuga los resultados más aceptables en cuanto a

TABLA VI. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS. DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO HELP

	Sahcab	Material del exbasurero	Mezcla sahcab-material del exbasurero 67-33	Mezcla sahcab-kancab 65-35	Desechos sólidos
Clasificación SUCS	ML	CL	ML	CL - ML	No aplica
Porosidad (%)	32.7	43.1	39.7	39.6	78.9
Conductividad hidráulica (cm/s)	2.8565×10^{-5}	1.24×10^{-4}	3.9681×10^{-5}	8.1×10^{-6}	5.999×10^{-2}
Capacidad de campo (%)	24.4	27.7	30.7	33.4	47
Punto de marchitamiento (%)	13.6	16.5	18	23	8.21

TABLA VII. BALANCE HIDROLÓGICO OBTENIDO DEL MODELO HELP. LOS RESULTADOS SE REPORTAN COMO PORCENTAJE DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL

	Sahcab	Material del exbasurero	Mezcla sahcab-material del exbasurero 67-33	Mezcla sahcab-kancab 65-35
Escorrentía	13.9	11.9	14.5	29.4
Evapotranspiración	58.7	58.4	57.8	61.3
Percolación	27.2	29.5	27.6	9.3

disminución de la conductividad hidráulica ($k = 8.1 \times 10^{-6}$ cm/seg) e incremento en la plasticidad (I.P. = 7.36), lo que facilitaría su colocación y compactación en el campo, manteniendo un bajo porcentaje de contracción lineal (4.26%) minimizando así la posibilidad de agrietamiento. Por lo tanto, se propone la mezcla sahcab-kancab 65-35, en volumen, como recubrimiento o cubierta diaria en sitios de disposición de desechos sólidos en la región. Esta mezcla de materiales no debe fallar estructuralmente durante su instalación o a causa del esfuerzo que le impriman los desechos, siempre y cuando se siga un esquema adecuado de construcción y mantenimiento de las cubiertas.

El recubrimiento minimiza la cantidad de lixiviado y contaminantes que llegan a las capas subyacentes del suelo disminuyendo físicamente el movimiento del lixiviado y por consiguiente de los contaminantes que éste transporta o absorbiendo algunas de las sustancias arrastradas por el agua que se mueve a través de él. El resultado de la utilización de una mezcla en volumen de 65 % de sahcab y 35 % de kancab como cubierta diaria y barrera de un sitio de disposición ubicado en la región sería la reducción a más de la tercera parte de la cantidad de lixiviado que se produciría en el sitio de disposición en las condiciones de operación prevalentes en la ciudad de Mérida, Yucatán, según los resultados de la simulación efectuada con el modelo HELP.

La utilización de sahcab como cubierta diaria de un sitio de disposición regional, parece no mejorar sustancialmente la cantidad de lixiviado generado en las condiciones actuales; aunque por ser un material no contaminado, estable y con otras propiedades que el modelo HELP no pondera, podrían presentarse en la práctica mejores resultados de los previstos si se toma en cuenta únicamente sus propiedades físicas. Las reacciones químicas que puedan degradar al sahcab no fueron objeto de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), a través del proyecto de investigación denominado: "Atenuación Natural y Soluciones en la Remediación de SDFDS", según

convenio clave 32489-T. Asimismo, agradecen a los revisores cuyos comentarios fueron muy valiosos en la presentación de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- AASHTO. (1974). *Manual de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transporte*. Estados Unidos de América.
- ASTM. (1981). *Manual de la Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales*. Estados Unidos de América.
- Benson C.H., Zhai H. y Wang X. (1994). Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *J. Geotech. Engineer.* 120, 366-387.
- Bowles J.E. (1981). *Manual de Laboratorio de Mecánica de Suelos en Ingeniería Civil*. McGraw Hill, Bradley, México, 213 p.
- Comeau S., Chiasson P., Massiera M. y Caissie M.A. (1998). Liner construction using tills composed of weakly cemented particles. En: *Environmental Geotechnics*. Sêco e Pinto (ed). A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda, vol. 1, pp. 77-82.
- Daniel D.E. (1984). Predicting hydraulic conductivity of clay liners. *J. Geotech. Engineer.* 110, 285-300.
- Daniel D.E. (1998). Landfills for solid and liquid wastes. En: *Environmental Geotechnics*. Sêco e Pinto (Ed.). A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda, vol. 4, pp. 1231-1246.
- Delta Ingeniería Ambiental e Ingeniería Ambiental de México. (1995). *Proyecto de clausura del tiradero actual y diseño de un nuevo relleno sanitario para la ciudad de Mérida, Yucatán*. Gobierno del Estado de Yucatán. Ayuntamiento de Mérida. Mérida, Yucatán, México.
- Diario de Yucatán. (1998). Nuevos esfuerzos para resolver el lío de la basura. Sección local, p. 1. 18 de abril. Mérida, Yucatán, México.
- Diario Oficial de la Federación. (1993). Normas Oficiales Mexicanas para la Protección Ambiental. NOM-057-ECOL-1993. Que establece los requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. 22 de octubre de 1993, México.
- Diario Oficial de la Federación. (1996). Normas Oficiales Mexicanas para la Protección Ambiental. NOM-083-ECOL-1996. Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los

- residuos sólidos municipales. 25 de noviembre de 1996, México.
- Dunn R.J. y Palmer B.S. (1994). Lessons learned from the application of standard test methods for field and laboratory hydraulic conductivity measurement. En: *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil* (D.E. Daniel y S.J. Trautwein, Eds.). ASTM. Filadelfia, *STP 1142*, 184-223.
- Juárez B. E. y Rico R. A. (1974). *Mecánica de Suelos. Vol. I*. Noriega Editores, Limusa, México, 642 p.
- Kú L. H. (1998). Estimación de la Producción del Lixiviado Generado en el Basurero Municipal de la Ciudad de Mérida, Yucatán. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. Mérida, Yucatán, México. 203 p.
- Manea S., Feodorov V. y Sofrone D. (1998). Limitations of clay for landfill applications. En: *Environmental Geotechnics*. Sêco e Pinto (Ed.). A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda, vol. 1, pp. 387-392.
- Monteiro V.E.D. y Jucá J.F.T. (1998). Geotechnical studies of clay liners in a municipal solid waste landfill, Brazil. En: *Environmental Geotechnics*. Sêco e Pinto (Ed.). A.A. Balkema, Rotterdam, Holanda, vol. 1, pp. 185-190
- Rosales U. F. (1984). *Manual de ensaye de materiales para las prácticas de laboratorio de mecánica de suelos*. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. Mérida, Yucatán, México, 146 p.
- Sauri M. R. y Peniche J. I. (1993). *Desechos sólidos. Prácticas de laboratorio*. Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería, 34 p.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1967). *Instructivo para ensaye de suelos. Mecánica de Suelos*. México, D.F.
- Schroeder P.R. (1983). *Hydrologic evaluation of landfill performance*. Report of Water Resources Engineering Group. Environmental Laboratory. U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station. Vicksburg, M.O., EUA.
- Schroeder P.R., Dozier T.S., Sjoström J.W. y McEnroe B.M. (1995). *Hydrologic evaluation of landfill performance HELP Model Version 3.04*. Developed by Environmental Laboratory. U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station for U.S. Environmental Protection Agency Reduction Engineering Laboratory. Vicksburg, M.O., EUA.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. (1972). *VI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. México, D.F. 69 p.
- Wallace J.F., Sacris R.R. y Rosik E.E. (1994). Two case histories: field sealed double ring infiltrometer (SDRI) and laboratory hydraulic conductivity comparison test programs. En: *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil* (D.E. Daniel y S.J. Trautwein, Eds.). ASTM. Filadelfia, *STP 1142*, 559-568.