

DISEÑO DE SUELO-CEMENTO PARA LA IMPERMEABILIZACIÓN DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL.

María de Lourdes Payán Arjona
Lorenzo Tuyub Sánchez
José Adonay Cetina Medina

RESUMEN.

En el presente trabajo se implementó un método a bajo costo para la impermeabilización de sitios de disposición final (basureros) municipales utilizando materiales que existen en la región de la Península de Yucatán y que son de fácil acceso; como es el sahcab (grava arena limosa arcillosa, común en la región) y el cemento Portland.

El método consiste en la obtención de una mezcla de suelo (sahcab), cemento y agua, en ciertas proporciones que al ser compactada, forme una barrera lo más impermeable para ser utilizada en la construcción de sitios de disposición final de residuos, e impedir que los líquidos contaminantes de la basura (lixiviados) puedan infiltrarse al subsuelo y contaminar los mantos freáticos, que son la fuente de abastecimiento principal de la Península de Yucatán, en especial del Estado del mismo nombre.

El trabajo tiene especial atención en sustituir los métodos tradicionales de impermeabilización de los sitios de disposición de los residuos utilizando una mezcla económica y de fácil construcción, a fin de que los municipios tengan la oportunidad de contar con un lugar para disponer sus residuos y contribuir al cuidado del medio ambiente.

PALABRAS CLAVE.

Sahcab, Mezcla suelo-cemento, Lixiviado, Compactación.

ABSTRACT

In this paper a low cost method was implemented for the waterproofing of final disposal sites (municipal landfills) using materials that exist in the region of the Yucatan Peninsula and are easily accessible; As is the sahcab (gravel clay loam sand, common in the region) and Portland cement. The method consists in obtaining a mixture of soil (sahcab), cement and water, in certain proportions that when compacted, forms a barrier that is most impermeable to be used in the construction of final disposal sites of waste, and prevent. The contaminating liquids of the garbage (leachate) can infiltrate the subsoil and contaminate the groundwater, which is the main source of supply of the Yucatan Peninsula, especially the State of the same name.

The work has special attention in replacing the traditional methods of waterproofing of the sites of disposition of the residues using an economical mixture and of easy construction, so that the municipalities have the opportunity to have a place to dispose their residues and to contribute to the environmental care

KEY WORDS.

Sahcab, cement, waste, waste disposal site, mixing soil, leachate, compaction.

INTRODUCCIÓN.

Dentro de la problemática detectada en materia de residuos sólidos en los 106 municipios que conforman el estado de Yucatán, se han identificado elementos que originan la contaminación del medio ambiente y sobretodo del manto freático; entre los cuáles se encuentran: la quema de residuos sólidos en tiraderos a cielo abierto, la disposición de estos residuos en las vía pública, principalmente a orillas de caminos y carreteras, la disposición sin control en basureros a cielo abierto en lugares alrededor de las poblaciones de los municipios y la falta de cultura para separar los residuos (SEMARNAT, 2012).

Lo anterior ocasiona impactos ambientales y sociales que muchas veces contribuyen a generar vectores que lesionan la salud de nuestra población. Entre estos vectores podemos mencionar:

- Generación de lixiviados con concentraciones elevadas de contaminantes
- Contaminación del suelo
- Afectación de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea.
- Emisión a la atmosfera de sustancias y compuestos contaminantes (metano, dióxido de carbono, etc.)
- Combustión de biogás
- Proliferación de fauna nociva
- Problemas de salud publica
- Afectaciones de humedales y manglares
- Deterioro del paisaje
- Proliferación de sitios no controlados.

La mala elección de un sitio para disponer los residuos y un mal manejo de los desechos afecta, no solamente a las zonas cercanas al sitio, sino también a las aledañas.

En el estado de Yucatán la situación es grave debido a las características hidrológicas que son de tipo Kárstico, conformado en su mayoría de roca caliza que en ocasiones tiene fracturas y grietas, situación que implica propiedades de permeabilidad alta, permitiendo la infiltración de todo tipo de líquidos que acarrear sustancias que escurren de manera vertical a través del suelo llegando a ríos subterráneos existentes. Yucatán posee un acuífero subterráneo, que está cercano al nivel del suelo, favorece la contaminación de nuestro recurso hídrico del cual nos abastecemos.

La población en los últimos años ha tomado conciencia de la problemática en las distintas localidades y municipios, demanda una acción más decidida de las instituciones públicas para solucionarla, y se han creado en muchos de ellos rellenos sanitarios.

Los residuos dispuestos inadecuadamente generan contaminación de los mantos freáticos y acuíferos, con la infiltración de los lixiviados generados por la degradación de los materia orgánica y como producto de la infiltración del agua de lluvia que al atravesar (percollar) la masa de desechos, disuelve, extrae y transporta (lixivia) los sólidos, líquidos y gases que están presentes en los residuos, lo cual causa grandes problemas de contaminación.

La protección de los mantos freáticos, debe realizarse creando una barrera impermeable en los sitios donde se van a disponer los residuos, puede ser con una celda de relleno sanitario, debiendo asegurar que el coeficiente de conductividad hidráulica sea mínimo de 1×10^{-7} cm/seg, (sitios categoría A B y C) según la norma NOM-083-SERMANAT-2003.

Es posible alcanzar este valor de conductividad hidráulica, empleando una membrana impermeable sintética (geomembrana), pero esto hace que un relleno sanitario sea costoso y requiere de mano de obra calificada y un adecuado control en la instalación y calidad en cada etapa del proceso de implementación. Debido al alto costo y a los problemas que se generan en las instalaciones de las geomembranas, muchas poblaciones del estado de Yucatán no cuentan con este servicio recurriendo a sitios como botaderos a cielo abierto.

En este trabajo se presenta una propuesta para la creación de una barrera impermeable utilizando suelo y cemento en los rellenos sanitarios que evitara la infiltración de los lixiviados al manto freático, es una propuesta de bajo costo comparado con los rellenos sanitarios que utilizan geomembranas, además en su construcción no se requiere de mano de obra especializada y favorecerá en los municipios la reducción de sus contaminantes.

La propuesta consiste en diseñar una mezcla óptima de sahcab-cemento que reúna las características necesarias y similares de permeabilidad y resistencia al de un concreto simple, esta mezcla servirá para impermeabilizar los rellenos, cumpliendo la norma utilizada en México (SEMARNAT/GTZ, 2004), para la protección de los sitios de disposición final.

Materiales y Métodos.

Las pruebas que se realizaron a los diferentes materiales como sahcab, cemento y a la mezcla sahcab-cemento (Payán, 2002), se efectuaron siguiendo las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM), vigentes en cada caso y el instructivo para el ensaye de pruebas de la Comisión Nacional de Agua (CNA, 1990).

La metodología se organizó en cinco etapas:

Etapa 1. Muestreo de sahcab

Etapa 2. Pruebas al sahcab

- Análisis granulométrico
- Límites de consistencia
- Prueba de compactación Próctor modificada

Etapa 3. Pruebas al cemento

- Densidad del cemento
- Peso volumétrico suelto del cemento
- Consistencia normal
- Tiempo de fraguado

Etapa 4. Pruebas para la mezcla de suelo-cemento

- Prueba de compactación Próctor modificada
- Prueba de resistencia a la compresión simple
- Prueba de Permeabilidad

Etapa 5. Pruebas físico-químicas al lixiviado

Etapa 1. Muestreo de sahcab.

El muestreo del sahcab se hizo en forma manual, para la toma de las muestras se hicieron ranuras o canales verticales, desde la parte más alta del montículo hasta la base, con la finalidad de tomar las porciones representativas del suelo seleccionado.

El número de muestras tomadas fue de 16, cada muestra pesó aproximadamente 80 kg. Se procedió a su cuarteo y preparación para las diferentes pruebas que se les realizaron. Para la operación del cuarteo se tomó como referencia la norma ASTM C702-93.

Los bancos muestreados fueron tres como muestra la figura 1.



Figura 1. Ubicación de los bancos estudiados.

Etapas 2. Pruebas al sahcab.

Las pruebas se realizaron al sahcab con la finalidad de poder clasificarlo e identificar, así como determinar la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo del mismo.

Análisis granulométrico

El análisis granulométrico tiene por objetivo determinar las cantidades en que están presentes partículas de diferentes tamaños en el suelo (sahcab); la prueba consiste en separar y clasificar por tamaños los granos que componen el suelo, ya que a partir de ésta, es posible tener una idea aproximada de sus propiedades.

Se utilizó el análisis mecánico, basado en la norma ASTM C136, incluye la determinación de la distribución granulométrica de partículas gruesas y finas por tamaños mediante el cibrado.

Límites de consistencia

Los límites de consistencia o límites de Atterberg, se basan en el concepto de que los suelos finos presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido del agua. Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad; para las muestras se determinaron los límites según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).

Para el límite líquido se utilizó el dispositivo llamado copa de Casagrande, el objetivo de esta prueba es determinar la humedad correspondiente al límite líquido, el cual establece la humedad necesaria para cerrar la ranura a los 25 golpes.

El límite plástico es la frontera entre los estados plásticos y semisólido. Para poder determinarlo en el laboratorio, se hace rodar una muestra de suelo sobre una superficie (vidrio), cuando los rollitos llegan a 3mm., se fracturan o rompen, se dice que el suelo tiene la humedad correspondiente al límite plástico.

Esta prueba tiene el objetivo de determinar la humedad correspondiente al límite plástico haciendo las operaciones mencionadas.

Los límites de consistencia se determinaron siguiendo los procedimientos descritos en los instructivos para ensayos de suelos de la CNA.

Prueba de Compactación Próctor Modificada

La compactación es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades ingenieriles.

La compactación de los suelos se llevan a cabo para incrementar su resistencia, reducir su compresibilidad y hacerlo más impermeable, esto se logra sujetando al suelo a técnicas convenientes que aumentan su peso específico seco y disminuye sus vacíos, (figura 2).



Figura 2. Estructura del suelo-cemento compactado.

El objetivo de la prueba de compactación es la obtención del máximo peso específico seco (peso volumétrico seco máximo) y la humedad de compactación óptima.

La prueba de compactación óptima utilizada fue la Próctor modificada (figura 3), cuya energía de compactación es de 27.2 kg-cm/cm^3 , obtenida al utilizar un molde cuyas dimensiones son: 10.14 cm de diámetro, 11.65 cm de altura; el peso del martillo es de 4.833 kg y la altura de caída de 45.2 cm. Se compactaron en tres capas con un total de 39 golpes por capa. Esta prueba se basó en la norma ASTM D-1557.



Figura 3. Realización de la prueba de compactación Proctor Modificada.

Etapas 3. Pruebas al cemento.

Densidad del Cemento

Esta prueba permite la determinación de la densidad aparente del cemento hidráulico. Su principal objetivo es la de comparar valores de la misma de los demás cementos y se emplea en el diseño y control de mezclas de concreto (De la Fuente, 1995). Esta prueba se realizó siguiendo la norma ASTM C188-44.

Peso Volumétrico Suelto del Cemento

El peso volumétrico del cemento es un dato necesario para el diseño de mezclas de concreto; así como para conversiones de pesos y volúmenes en las mismas. La prueba se efectúa de acuerdo a la norma ASTM C29-60 (Referente a pesos unitarios de agregados).

Consistencia Normal

La consistencia normal de un cemento es la cantidad de agua que debe añadirse al cemento para lograr la plasticidad en el mismo. La prueba de consistencia normal se lleva a cabo siguiendo la norma ASTM C187-55.

Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado es aquel en el cual la mezcla permanece plástica para su mejor manejo y acomodo. Este parámetro se determinó con el aparato de Vicat. La prueba se realiza conforme a la norma ASTM C191-58.

Etapa 4. Pruebas para la mezcla suelo-cemento.

Se llevaron a cabo pruebas en la mezcla de suelo-cemento, para determinar sus propiedades tales como la resistencia a la compresión simple y su permeabilidad.

Prueba de Compactación Próctor Modificada

La prueba de compactación utilizada en la mezcla, es la Próctor Modificada, de manera similar a la realizada en el sahcab. En este trabajo, el valor del cemento fue de 10% en peso del suelo.

La cantidad de agua adicionada durante la compactación se realizó tomando como referencia los valores obtenidos en la compactación del sahcab (humedad óptima entre el 14 y el 17%). Después de preparar la mezcla, se esperaba entre 5 y 10 minutos para que se llevara a cabo la reacción del cemento y el agua; posteriormente es compactada, (figura 5). La norma utilizada es la ASTM D-1557.



Figura 5. Cilindro de suelo-cemento para fallar a compresión simple.

Prueba de Resistencia a la Compresión Simple

El objetivo de esta prueba es determinar su resistencia a diferentes edades, (figura 6).

Para realizar el curado de los cilindros del suelo-cemento, fue necesario cubrirlos y envolverlos con paños de tela húmedos y rociarlos con un aspersor de agua una vez por día, con el fin de que la muestra no pierda humedad. La mezcla no se podía curar sumergida en agua ya que se desmoronaría.

En este trabajo se fabricaron 20 cilindros, (figura 7); de los cuales 8 se llevaron a la ruptura a la edad de 7 días y los 12 restantes a la edad de 28 días.



Figura 6. Realización de la Prueba de compresión simple.

Prueba de permeabilidad

La permeabilidad es la propiedad que tiene una sección unitaria de un medio natural o artificial, para permitir el paso de un fluido a través de su estructura, debido a la carga producida por un gradiente hidráulico. La prueba de laboratorio utilizada para determinar la permeabilidad del suelo-cemento, es la prueba de carga de constante.

El contenido óptimo de agua para preparar los especímenes de sahcab-cemento se obtuvo de la prueba de compactación de la mezcla usando el porcentaje requerido (valores entre el 12 y 19%) para obtener el peso volumétrico máximo.

Para la compactación se utilizó la misma energía (27.2 kg-cm/cm^3); las dimensiones del molde son: 10.20 cm de diámetro, 10.60 cm de altura; el peso del martillo es de 4.833 kg y la altura de caída de 45.2 cm. Se compactaron en tres capas con un total de 38 golpes por capa.



Figura 7. Muestras de suelo -cemento de los bancos estudiados.

Etapa 5. Pruebas para el lixiviado

Para esta prueba se utilizó el lixiviado recolectado en una de las lagunas de evaporación de relleno sanitario de la ciudad de Mérida (figura 8), su color era negro y poseía un olor nauseabundo.

Se realizó la prueba pero, después de un mes, no se obtuvieron resultados, por lo que se redujo el espesor a una sola capa de 3 cm, compactada por 31 golpes. De esta manera, el lixiviado pudo pasar a través del permeámetro, y tomándose las lecturas correspondientes para calcular el coeficiente de conductividad hidráulica de la mezcla suelo-cemento, (figura 9).



Figura 8. Lugar de muestreo del lixiviado.



Figura 9. Prueba de permeabilidad de carga constante.

RESULTADOS Y DISCUSIONES.

En base a los resultados obtenidos, el sahcab extraído de los diferentes bancos fue clasificado de acuerdo al estándar SUCS de la siguiente manera.

Banco 1. SC (arena arcillosa)

Banco 2. SM (arena limosa)

Banco 3. CL (arcilla de baja plasticidad)

De la prueba de compactación Proctor Modificada se obtuvieron los siguientes valores (tabla 1):

Tabla 1. Resultados de la humedad óptima y peso volumétrico seco máximo del sahcab.

BANCO No.	Peso volumétrico seco máximo (kg/m ³)	Humedad Óptima (%)	SUELO
1	1724	17.4	SC
2	1822	14.6	SM
3	1830	14.6	CL

De las pruebas realizadas al suelo-cemento, se obtuvieron (tabla 2):

Tabla 2. Resultados de la humedad óptima y peso volumétrico seco máximo del suelo-cemento.

BANCO No.	Peso volumétrico seco máximo (kg/m ³)	Humedad Óptima (%)
1	1639	18.6
2	1820	12.7
3	1903	12.0

Respecto a los resultados en la conductividad hidráulica obtenida al realizar las pruebas de permeabilidad de la mezcla suelo-cemento, tenemos (tabla 3):

BANCO No.	Coficiente de conductividad hidráulica k (cm/s)
1	2×10^{-8}
2	2×10^{-5}
3	3×10^{-8}

La Tabla 4 muestra los resultados promedio de las pruebas de resistencia a la compresión simple de las muestras cilíndricas de suelo-cemento a la edad de 28 días:

BANCO No.	Resistencia (kg/cm²)
1	87.64
2	142.27
3	79.77

De acuerdo a la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, los bancos 1 y 3 dan cabal cumplimiento por las siguientes razones:

- Es más económico tanto por el material como por la instalación.
- La materia prima se encuentra en todo el estado y no puede monopolizarse.
- No se requiere de mano de obra calificada, pudiéndose adiestrar a los mismos habitantes de los municipios para su construcción.
- Cumple con los requisitos expresados en “la Guía para la realización de planes de regularización conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003”.
- En base a los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas en el laboratorio, se concluye que esta mezcla es apta para utilizarse como base de impermeabilización.

Con relación al suelo-cemento realizado con el sahcab del banco No. 2, no cumple para el tipo de relleno sanitario que se requiere (tipos A, B, C), sin embargo, si es apto para ser utilizado como una alternativa en la impermeabilización de rellenos sanitarios tipo D (NOM-083-SEMARNAT-2003) ya que sólo se requiere un coeficiente de conductividad hidráulica de 1×10^{-5} cm/s.

Así mismo, los materiales de los banco 1 (SC – Arena arcillosa con grava) y 3 (CL – Arcilla ligera arenosa), empleando el 10% de cemento en peso del suelo cumplen con el rango establecido (1×10^{-7} cm/s) para el coeficiente de conductividad hidráulica (permeabilidad).

La propuesta logró cumplir con los criterios establecidos en las normas, estableciendo una mezcla de sahcab-cemento de bajo costo, que pueda ser usado como base de impermeabilización en los rellenos sanitarios, asegurando la protección del suelo y los mantos acuíferos de la infiltración de los lixiviados

Como se dijo anteriormente, la construcción de un relleno sanitario sería una fuente de trabajo para las poblaciones, ya que se requiere de mano de obra para su construcción, manejo y mantenimiento, además, el reciclaje de la basura nos ofrece ventajas ambientales indiscutibles.

Haciendo una síntesis de los resultados obtenidos, podemos destacar varios puntos importantes expresados en la Tabla 5, la cual hace una comparación entre la impermeabilización con geomembranas y el método de suelo-cemento presentado en este trabajo.

Tabla 5. Comparativa de los métodos para impermeabilizar un relleno sanitario.

Impermeabilización sintética (Geomembrana)	Suelo-cemento (Mezcla sahcab-cemento)
Para su instalación el terreno debe estar nivelado, compactado, sin vegetación y libre de objetos punzo cortantes.	Para su implementación se requiere material producto de la explotación de un banco.
Tiene un espesor de 1.5 mm.	Tiene un espesor de 10 cm.

Requiere de un tratamiento especializado, además del personal capacitado para su instalación.	Es simple de colocar, e inclusive se puede capacitar a los mismos pobladores de la comunidad.
Proporciona un coeficiente de permeabilidad de 10^{-13} m/s.	Proporciona un coeficiente de permeabilidad de 10^{-8} m/s.
Tiene un costo de \$1,378.00 por m ² .	Tiene un costo de inversión inicial de \$399.00 por m ² .
Tiene un periodo de vida de 20 años.	Tiene un periodo de vida de 10 a 15 años.

CONCLUSIONES.

Después de analizar los resultados obtenidos con el suelo-cemento y compararlos con soluciones alternas disponibles en el mercado actualmente, el suelo-cemento (sahcab-cemento) brinda un menor costo por m² cubierto, es de fácil manejo y cumple con las normas de permeabilidad para los sitios de disposición final; además el mantenimiento y conservación es autofinanciable y propicia el autoempleo en las comunidades.

Esta mezcla también puede tener otros usos, por ejemplo: se puede emplear para resolver problemas de contaminación por producción de excretas de cerdos en las granjas del medio rural, ya que éstas no cuentan con los sumideros adecuados, generando mucha infiltración de desechos al manto freático.

El suelo-cemento puede utilizarse también en la construcción de lagunas para tratamiento aerobio de estas excretas evitando así, la infiltración directa de contaminantes al subsuelo y previniendo muchas enfermedades.

BIBLIOGRAFÍA.

CNA. (1990). Mecánica de Suelos. Instructivo para ensaye de suelos. México: IMTA

Disponible en: http://repositorio.inecc.gob.mx/ae/ae_010513.pdf

De la Fuente, E. (1995). Suelo-cemento: usos, propiedades y aplicaciones. México: IMCC

Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Bogotá: Universidad de Antioquia.

Norma ASTM C 29-60. Método de ensayo normalizado para determinar la densidad aparente del cemento.

Norma ASTM C 136. Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos

Norma ASTM C 187-55 Consistencia normal del cemento hidráulico

Norma ASTM C 188-44 Método de prueba para determinar la densidad del cemento hidráulico

Norma ASTM C 191-58 Constancia de volumen

Norma ASTM C 702-93 Muestreo de agregados

Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCE-1999. Industria de la construcción, cementos hidráulicos, especificaciones y métodos de prueba. México

Piazzesi, F. (1990). Suelo-cemento industrializado. México: Revista de Construcción y Tecnología

Payán, M. (2002). Estabilización de sahcab con cemento Portland Tipo I para la construcción de pisos en viviendas del medio rural. Mérida: UADY.

Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/467/46760204.pdf>

SEMARNAT (2003). Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. México: SEMARNAT

SEMARNAT (2004). NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. México: SEMARNAT

Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004

SEMARNAT/GTZ, (2004). Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003. México: SEMARNAT.

Disponible en: http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/Guia_Cumplimiento_NOM_083.pdf

SEMARNAT (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México. México: SEMARNAT.

Disponible en: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf

SEMARNAT (2005). Guía para realización de planes de regularización conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003. México