

Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios



Abstract

This project studies municipal solid waste (MSW) settlement. The objective is to estimate, predict and compare theoretical settlements thru the use of existing settlement models. Also, to recommend actions to take in order to calibrate these models to the situation in Costa Rica and run characterizing laboratory tests in the soil and the waste by extracting samples of different ages from a landfill.

In parallel, an investigation of the components that influence MSW settlement, how it happens and how to calculate them is developed. This research included also the country's reality of landfilling.

New information about laboratory testing in waste is generated to understand the bacteria condition in that environment. Each test's information is related to how it influences settlement on the landfill.

From a total of 11 models reviewed, it is determined that the model made by Sowers in 1973 is the most adaptable one. And the model made by Babu et al (2010) is the most complete one, nevertheless, not to be used in Costa Rica because of the lack of information at present. But, none of the models can be utilized to determinate waste settlement without previous calibration on field, because the results are not precise.

Key words: Landfill, settlement, waste settlement model, waste, settlement modeling.

Resumen

Este proyecto estudia los asentamientos en rellenos sanitarios. Tiene como objetivo estimar, predecir y comparar asentamientos teóricos mediante el uso de modelos existentes. Además recomendar acciones a seguir para calibrar estos modelos a la realidad costarricense y realizar pruebas de laboratorio que caractericen tanto el suelo como el desecho mediante la extracción de muestras de suelo y desecho de diferentes edades de un relleno.

Paralelo a esto, se investiga qué factores influyen en los asentamientos de un relleno, cómo se dan estos asentamientos, y cómo se pueden calcular con fundamento científico. Se incluyó además cuál es la realidad del país respecto al uso de rellenos sanitarios.

Se genera información nueva sobre pruebas al desecho para conocer en qué condiciones están las bacterias en ese medio. Se relaciona cada prueba con su influencia en los asentamientos del relleno.

De 11 modelos analizados, se determina el modelo creado por Sowers (1973) como el más adaptable y el modelo de Babu et al (2010) como el más completo, aunque no útil actualmente, por la poca información que hay hasta el momento en Costa Rica. Sin embargo, ni ese ni ningún modelo debe usarse para determinar asentamientos sin previa calibración en campo, pues los resultados no son veraces.

Palabras clave: relleno sanitario, asentamiento, modelo de asentamiento de desecho, desecho, modelado de asentamientos.

Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios

Determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios

IRENE RIVERA VÁSQUEZ

Agosto del 2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

<u>Contenido</u>	1	<u>MODELOS QUE INCORPORAN</u>	
<u>Prefacio</u>	2	<u>BIODEGRADACIÓN</u>	22
<u>Resumen ejecutivo</u>	3	<u>COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS DE</u>	
<u>Introducción</u>	6	<u>ASENTAMIENTO</u>	24
<u>Metodología</u>	8	<u>Caracterización del Material</u>	25
<u>INVESTIGACIÓN TEÓRICA</u>	8	<u>¿CUÁLES SON LOS DATOS?</u>	25
<u>INVESTIGACIÓN PRÁCTICA</u>	8	<u>Resultados: Pruebas Realizadas</u>	28
<u>LABORATORIOS UTILIZADOS</u>	9	<u>PRUEBAS EN LOS DESECHOS</u>	28
<u>PRUEBAS EN EL DESECHO</u>	9	<u>PRUEBAS EN SUELOS</u>	30
<u>PRUEBAS EN EL SUELO</u>	10	<u>Análisis de los resultados</u>	33
<u>SELECCIÓN DEL MODELO</u>	10	<u>SELECCIÓN DEL MODELO DE</u>	
<u>Rellenos Sanitarios y Costa Rica</u>	11	<u>ASENTAMIENTO:</u>	33
<u>REGLAMENTO DE RELLENOS SANITARIOS</u>		<u>PRUEBAS EN DESECHO:</u>	37
.....	11	<u>PRUEBAS EN SUELOS:</u>	40
<u>TEORÍA DE RELLENOS SANITARIOS</u>	11	<u>Conclusiones</u>	41
<u>SITUACIÓN ACTUAL DE LOS RS</u>	13	<u>Recomendaciones</u>	42
<u>CONSECUENCIAS DE LOS RS</u>	14	<u>Apéndices</u>	43
<u>RS COMO SOLUCIÓN AL TEMA DE LA</u>		<u>1. HOJA DE TRABAJO: MODELO DE</u>	
<u>BASURA</u>	14	<u>SOWERS</u>	43
<u>Asentamientos en RS</u>	15	<u>2. HOJA DE TRABAJO: MODELO DE</u>	
<u>FASES DEL PROCESO DE ASENTAMIENTO</u>		<u>BJARNGARD Y EDGERS</u>	43
<u>EN RS</u>	16	<u>3. PRUEBAS AMBIENTALES</u>	43
<u>MECANISMOS DE ASENTAMIENTO</u>	16	<u>4. PRUEBAS SUELOS</u>	43
<u>FACTORES INFLUYENTES EN EL</u>		<u>Referencias</u>	44
<u>ASENTAMIENTO DE UN RS</u>	18		
<u>Modelado de Asentamientos en RS</u>	19		
<u>MODELOS BASADOS EN LA MECÁNICA DE</u>			
<u>SUELOS</u>	19		
<u>MODELO BASADOS EN LA REOLOGÍA</u>	20		
<u>MODELOS EMPÍRICOS</u>	21		

Prefacio

Conocer los mecanismos que gobiernan el asentamiento de los desechos sólidos en rellenos sanitarios y desarrollar medios para describir y predecir de forma precisa la tasa y magnitud de los asentamientos se ha convertido cada vez más en un tema de vital importancia en el diseño y operación de estas estructuras.

El cálculo y la predicción de asentamientos contribuyen a la determinación del periodo de vida útil de los rellenos sanitarios, además de proporcionar detalles determinantes en el diseño de sus componentes, como los sistemas de drenaje o capas de cobertura.

La determinación de asentamientos en los rellenos sanitarios ha sido un reto que enfrentan los ingenieros dedicados a ese campo por años. Desde el intento de Sowers en 1973 de estudiar el tema, hasta las publicaciones más recientes. Es un desafío porque involucra la participación de factores muy diferentes en su naturaleza; algunos de ellos son: tipo de desecho, contenido orgánico, contenido de humedad, densidad de compactación, compresibilidad, cantidad de nutrientes disponibles para la actividad biológica, nivel de pH, temperatura, y vejez del relleno. El cálculo de asentamientos no sólo varía con el tiempo sino también con la profundidad. Lo anterior principalmente porque está la acción del peso de las capas superiores, la presurización temporal que sufre el relleno por efecto de los gases de descomposición y la acción de los líquidos generados.

En la actualidad, ni los investigadores tienen un completo entendimiento científico de los fenómenos físicos, químicos y biológicos que controlan el desempeño de un relleno. Sin embargo, siguen siendo la práctica común en el mundo entero. Costa Rica no es la excepción. Innumerables pruebas a través de la historia del país dan evidencia de mal manejo y desconocimiento severo del funcionamiento y la

ingeniería detrás de estas estructuras. La factura ambiental la han pagado todos.

Debe darse estudio urgente de parte de las entidades gubernamentales que están encargadas de regular los rellenos. Este documento pretende dar un breve panorama general sobre los desechos sólidos en el país, además, se enfoca en los modelos de asentamiento propuestos para rellenos sanitarios y su posible aplicabilidad a los rellenos del país, mediante el cálculo de asentamientos teóricos.

Resumen ejecutivo

Conocer los asentamientos en un relleno sanitario es un asunto complejo cuya importancia aumenta en la misma medida que el espacio en las ciudades disminuye. ¿Por qué? Porque la medición de asentamientos permite un estimado mucho más acertado del tiempo de vida del relleno, y de la capacidad de almacenaje del mismo. Además, previene del daño de estructuras temporales o permanentes que se construyen en los rellenos.

Este proyecto pretendió:

1. Estimar, predecir y comparar asentamientos teóricos de la matriz suelo-basura mediante el uso de modelos existentes.
2. Recomendar acciones a seguir para calibrar los modelos al tipo de relleno que se desarrolla en el país.
3. Realizar pruebas de laboratorio en muestras de desecho y muestras de suelo provenientes de un relleno sanitario para caracterizar los mismos.

El proyecto consiste en una investigación teórica que incluye la realidad nacional respecto al uso de rellenos sanitarios y de la composición del desecho en Costa Rica. Abarcó conceptos básicos como el de relleno sanitario en sí, la teoría que explica cómo los asentamientos se dan en el relleno, cuáles son las fases de este proceso, y cada mecanismo que causa grandes o pequeños asentamientos.

Esta investigación reunió además un total de 11 modelos de asentamiento producidos por diferentes autores a lo largo del tiempo. Se trata de ecuaciones matemáticas que buscan representar cuánto se ha asentado un relleno sanitario.

Cuando se evaluó el uso de los rellenos sanitarios del país, se encontró una realidad devastadora, de 3900 toneladas que se generaban en el país el 2007, sólo 2300 se depositaban en un relleno sanitario. Además, de los 81 cantones analizados, sólo 3 depositan la totalidad de su desecho en un relleno sanitario.

Números de este tipo se tomaron como clara señal de un inadecuado manejo gubernamental en el tema de los desechos y la gran necesidad de organizar los sitios de depósito, ya que la basura crece día a día. Por lo tanto, tener planificadas fechas de cierre, capacidades máximas y vida útil del relleno tienen cada vez más importancia.

Según un estudio del año 1994 y otro del año 2002 el contenido de desecho orgánico disminuyó en un 8%. Y, ¿cómo se relacionó esto con el cálculo de los asentamientos? Considerando el hecho de que los mayores asentamientos se dan por descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, una predicción acertada de asentamientos requiere un estudio de composición del desecho.

De acuerdo con la investigación realizada, los mayores asentamientos se dan por:

1. Compresión mecánica
2. Biodegradación
3. Compresión por flujo plástico

Mientras que los pequeños asentamientos se dan por:

1. Fenómenos físico-químicos
2. Interacción
3. Consolidación

Y los principales factores influyentes en los asentamientos de los rellenos son:

1. Temperatura
2. Precipitación
3. Altura del relleno
4. Recirculación o ausencia de ella
5. Tipo de residuos
6. Contenido orgánico
7. Humedad
8. Compactación
9. Densidad
10. Compresibilidad
11. Nivel de pH

La temperatura, la recirculación de lixiviados, el contenido de orgánicos del desecho, el nivel de pH y la precipitación son factores de los que depende la actividad bacteriológica. La altura del relleno hace que aumente la densidad en las partes más profundas del relleno. Igualmente, la compactación que se le dé al relleno afecta la cantidad de vacíos interparticulares, que podrían o no rellenarse con sedimentos, o quizás con gases, producto de la descomposición. Ambas formas de relleno de vacíos provocan variaciones en el volumen del relleno.

Posterior a la investigación que se citó arriba, se evaluaron los modelos de asentamiento. Se consideraron modelos hechos por diferentes ingenieros en distintas partes del mundo. Se procedió, a generar la información para caracterizar tanto suelo como desecho, extraídos del relleno sanitario Los Mangos, ubicado en Alajuela, bajo la administración de la empresa WPP Continental.

Las muestras se clasificaron de acuerdo a la edad como sigue:

1. Muestra de 1 año de antigüedad (Se extrajo tanto desecho como suelo)
2. Muestra de 2 años de antigüedad (Se extrajo tanto desecho como suelo)
3. Muestra de 15 años de antigüedad sin bolsa (Se extrajo tanto desecho como suelo)
4. Muestra de 15 años de antigüedad con bolsa (Se extrajo un bolsa de basura que se encontraba cerrada, a pesar de ser desecho tan viejo)

En el desecho se realizaron las pruebas de:

1. Sólidos Totales
2. Contenido de Humedad
3. Sólidos Fijos
4. Sólidos Volátiles
5. Medición de pH
6. Demanda Química de Oxígeno DQO
7. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO
8. Metales Pesados: Cd, Pb, Cu, Fe.

Mientras que en el suelo las pruebas realizadas fueron:

1. Humedad natural
2. Granulometría
3. Límites de Atterberg
4. Gravedad Específica

5. Clasificación SUCS

En la etapa de análisis de resultados, se procedió a elegir los modelos con más compatibles con los rellenos sanitarios del país. Con base en este criterio, el modelo más apto es el de Sowers (1973) porque es más adaptable.

Este modelo tiene varias ventajas sobre los demás para el caso nacional. Considera tanto la compresión primaria como la secundaria, es capaz de representar asentamientos en botaderos, cuenta únicamente con dos parámetros que podrían ajustarse a nuestros rellenos más fácilmente y tiene fundamento geotécnico. Pero, al igual que todos los modelos no es perfecto, y no considera realmente la degradación, ni las características propias de cada relleno. Precisamente, por eso es apto para nuestros rellenos, porque en cierta forma, es menos local que lo modelos más modernos.

Otro fuerte candidato al modelado de rellenos sanitarios es el desarrollado por Bjarngard y Edgers (1990) que en realidad es una variación del modelo de Sowers. Goza de las mismas ventajas que el modelo de Sowers, sin embargo no es capaz de reproducir resultados coherentes antes de los 90 días.

Cuando se compara el modelo de Sowers contra el modelo de Bjarngard y Edgers, se evidencia una variación entre los resultados de 1.5m a los 5.5 años de las mediciones. La comparación entre los dos modelos aquí utilizados evidencia la importancia extrema de parámetros locales para cualquier modelo.

Por otra parte ambos modelos expresan matemáticamente un comportamiento incoherente con la realidad. Pues describen el asentamiento de las capas como igual aunque estas estén a distinta profundidad. Y siempre las capas más profundas experimentan mayor presión, por lo que se "hundén" más que las capas superiores.

Cuando se evalúa el asentamiento final, los resultados de ambos modelos son coherentes, y esto es respaldado por distintos autores citados en la bibliografía.

Los modelos que consideran la biodegradación como un fenómeno aparte, son mucho más complejos, y toman en consideración de una u otra forma la participación de gases y líquido producto de la descomposición. Esto los elimina de toda posibilidad de uso, pues ocupa de constantes y valores que no se consiguen en

nuestros rellenos. Sin embargo, en términos de cobertura, son los modelos que más ampliamente abarcan los asentamientos de los residuos.

Respecto a las pruebas de caracterización del desecho, se innovó con datos inexistentes en el país. Por ejemplo, parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (prueba DBO) nunca se había determinado a partir del desecho en un relleno, por lo que se está generando información nueva que debe ser revisada por investigaciones posteriores y comparada, para oficializar las características del relleno. Así, en un futuro se podrá generar un modelo que calcule los asentamientos de nuestros rellenos con mayor grado de precisión.

La prueba DBO se hizo para conocer la cantidad de materia degradable por medios biológicos (provoca asentamiento importante), la prueba DQO para medir la cantidad de materia degradable por medios químicos (no provoca un asentamiento significativo), la prueba de metales pesados se hizo para evaluar la toxicidad del relleno, la prueba de medición de pH se hizo para conocer en qué estado (ácido o básico) están las bacterias del relleno, la prueba de sólidos volátiles y sólidos fijos se llevó a cabo porque mide el contenido de orgánicos y material no orgánico respectivamente, mientras que la prueba de sólidos totales y contenido de humedad permite conocer qué porcentaje de la muestra es material volátil.

Se realizaron además pruebas de caracterización del suelo, con el fin de clasificarlo y conocer su desempeño como capa de cobertura diaria o capa de cobertura final. Se evaluó el contenido de humedad, esto para comparar diferentes puntos y poderse dar una idea de cómo está la evacuación de lixiviados y agua pluviales. Se realizó una granulometría para conocer la graduación del material y su clasificación; como era un suelo plástico se realizaron también los límites de Atterberg, con lo que se pudo clasificar como una arcilla limosa orgánica de baja plasticidad. Tal como su clasificación lo indica, esta arcilla no reacciona tanto a los cambios de humedad, por lo tanto se convierte en un buen elemento impermeable, ya que la formación de grietas es menor que una arcilla de alta plasticidad. Las grietas que la capa de cobertura diaria pueda tener o la capa de cobertura final son muy importantes a nivel operacional, pues permiten la entrada directa del

agua pluvial al relleno y además la salida de gases del relleno hacia la atmósfera.

Se concluyó entonces que cualquier modelo de asentamientos es local, y la única forma de que sea aplicable a la realidad costarricense es mediante la calibración de los parámetros que usa, solo así se podría evaluar la precisión de los mismos. Son innumerables los factores que influyen en el comportamiento de la basura, y lograr reproducibilidad en tales circunstancias es muy difícil. A pesar de que hay modelos excesivamente complejos, hay un modelo que es medianamente complejo y cubre bastante bien los aspectos principales del asentamiento en rellenos sanitarios, este es el modelo de Babu et al (2010). Es recomendable ahondar la investigación en éste modelo y su aplicabilidad al país.

Igualmente, se hizo evidente que la guía gubernamental en el tema de los rellenos sanitarios carece de verdadero fundamento técnico, por lo que no hay criterio para alargar el uso de un relleno, o planificar ya que su vida útil será menor; por lo tanto, el modelado de asentamientos cobra verdadera importancia en la actualidad.

Se recomendó además, un estudio de composición de la basura actualizado y haciendo uso de las técnicas estadísticas adecuadas, para poder conocer verdaderamente qué se está metiendo al relleno. Entre otras cosas, la incompatibilidad más grande de los modelos estudiados con el desecho en Costa Rica, se da por el tipo de desecho. Los modelos existentes provienen de países desarrollados, cuyo contenido de orgánicos es menor que el de los países en vías de desarrollo, por la naturaleza de consumo que los diferencia.

Se recomendó conservar registros de elevación de campo, para poder calibrar los parámetros que alimenten cualquier modelo de asentamiento que se elija.

Introducción

Este documento es un reporte de la investigación de los principales modelos para el cálculo de asentamientos en rellenos sanitarios, abarca un estudio del aporte de cada factor que influye en la medición de esos asentamientos. Incluye además una descripción del desecho en Costa Rica, y las legislaciones que regulan el funcionamiento de los rellenos sanitarios.

Conocer los asentamientos en rellenos permite 1) proteger obras internas desarrolladas por el operador del relleno y 2) predecir la vida útil del relleno, así como su capacidad máxima.

Los asentamientos en rellenos sanitarios provocan daños en estructuras drenantes, capas intermedias y obras de finalización, como lo son caminos o capas de cobertura. La vida útil del relleno es un dato de vital importancia para el diseño e inclusive, la viabilidad del proyecto. Por otro lado, la creación de estructuras temporales como caminos de acceso se ven fuertemente comprometidas por asentamientos en el desecho debajo de ellos. Por lo tanto, determinar asentamientos permite una logística más realista respecto a la operatividad de cualquier relleno sanitario. Además, el conocer la vida útil de un relleno no se limita a determinar cuándo puede cerrarse, sino a saber *cuánta basura* se puede acomodar en el relleno. Y así establecer que otro lugar de disposición se usará. Es por esto que calcular asentamientos es importantísimo para la planificación de la colocación de desechos que deben realizar las autoridades competentes, pues la basura nunca dejará de generarse.

En la actualidad, no se cuenta con ningún modelo de asentamiento para predecir asentamientos en la empresa visitada. WPP Continental mide asentamientos a partir de la experiencia adquirida, considerando en los primeros dos meses una disminución en la altura del 25%, y en el tercer mes una disminución acumulativa del 60% de la altura del relleno. Esta metodología de cálculo ha significado reparación de caminos de acceso casi continua, y aproximaciones bastante imprecisas sobre la vida

útil de una celda, y por tanto de la capacidad de recepción de un relleno dado.

La inversión que un relleno sanitario representa para cualquier comunidad es muy alta, otra razón por la que la planificación es tan importante, y por ende, el cálculo más preciso de los asentamientos.

Estudios de modelos de asentamiento son muchos alrededor del mundo, sin embargo, son de funcionamiento local y algunos en evaluación aún. En el país, son tan pocos los datos relativos al desecho, y se tiene tan poco tiempo de intentar lidiar responsablemente con la basura, que la aplicabilidad de cualquier modelo de asentamiento se pone en duda. Ése fue el objetivo principal de éste proyecto, evaluar si era posible o no usar los modelos existentes para calcular asentamientos en las condiciones de Costa Rica.

Se logró estudiar tanto como fue posible los asentamientos en rellenos sanitarios, tomar todos los factores influyentes en el proceso y detectar su nivel de influencia en el proceso de asentamiento. Se logró generar algunos datos inexistentes en el país, y actualizar aquellos alguna vez estudiados. Se logró también determinar un modelo de asentamiento que es más aplicable al desecho de Costa Rica, compararlo con criterio crítico y establecer formas realistas de mejorarlo. Además, se logró abrir una línea de investigación prácticamente inexplorada en el país, que será desarrollada en un proyecto de investigación de ingeniería civil en la Universidad de Costa Rica.

Para el desarrollo de este tema se utilizaron pruebas comunes en la ingeniería geotécnica e ingeniería ambiental. Se trata de un proyecto práctico y teórico, cuyo análisis se ha basado en informes del estado de la nación, entrevistas a personal en WPP Continental, investigaciones y publicaciones científicas relacionadas a modelos de asentamientos en rellenos sanitarios. Incluye el análisis de 11 modelos, y la consulta a varios libros

especializados en el manejo de desechos y en ingeniería geoambiental.

Respecto a la información existente, este proyecto amplía con los datos obtenidos, y establece una guía inicial del rumbo que podrían tomar las investigaciones de instituciones encargadas y los administradores de rellenos, para un bienestar común.

Metodología

Investigación teórica

El desarrollo de este proyecto consta de dos partes. La investigación teórica y la parte práctica. Dentro de la teoría se investigó cómo debe funcionar un relleno sanitario, mediante la consulta a fuentes bibliográficas como las publicadas por la Solid Waste Association of North America (SWANA), además de cuáles son las estructuras necesarias para el adecuado funcionamiento de éste. Esta información con el objetivo de conocer cómo debe hacerse un relleno, qué componentes mínimos requiere, y cómo pueden estos componentes afectarse por los asentamientos del desecho.

Se cubrió también cómo se dan los asentamientos en los rellenos y cuáles son los factores que afectan ése proceso, mediante la consulta a los documentos científicos publicados por distintos autores, principalmente Bowers (2000) y Leonard et al (2005). Ref [9 y 21]. Así es posible conocer lo que realmente ocurre en el relleno cuando este se está asentando, y entender los modelos creados por los distintos autores.

Se investigó cuáles eran los estudios sobre composición de la basura con los que cuenta el país. Fue posible utilizar dos estudios de composición, uno correspondiente al año 1994 y otro correspondiente al año 2002. La composición de los desechos es un factor influyente en el asentamiento que estos presenten, principalmente el aportado por la fracción orgánica de los mismos, ya que el contenido de orgánicos es el mayor generador de asentamientos en los rellenos.

Se hizo un estudio de la situación actual de los rellenos sanitarios en el país. Con base en la información de los Informes del Estado de la Nación y otras documentaciones gubernamentales se determinó la necesidad que tiene el país de reconsiderar el enfoque con que se manejan los desechos en Costa Rica.

Todos los fundamentos teóricos aquí expuestos se basan en papers, libros, y publicaciones oficiales, que se investigaron exhaustivamente con el fin de proporcionar un panorama integral de la situación de los desechos en Costa Rica y su influencia en los asentamientos de la basura. El aporte de instituciones como el Ministerio de Salud a nivel nacional y la Solid Waste Association of North America a nivel internacional han brindado lineamientos sobre cómo un relleno sanitario debe ser operado y porqué los asentamientos en los mismos son un tema constantemente estudiado. Además, es el Ministerio de Salud Pública el encargado de todo el tema relacionado a desechos en el país.

Por otra parte, los modelos de asentamiento analizados corresponden a publicaciones de distintos investigadores del mundo, mayoritariamente se usan documentos técnicos provenientes de Estados Unidos y la India. Las investigaciones en modelos hechas por Babu et al (2010) y Pauzzi (2010) son fuentes importantes en el tema, con un análisis a fondo de la las limitaciones y alcance de los modelos.

Investigación práctica

La parte práctica se llevó a cabo de la siguiente manera:

Se visitó el Relleno Sanitario Los Mangos en Alajuela. De ahí se extrajeron muestras de suelo y de desecho. Las muestras se clasificaron de acuerdo a la edad como sigue:

1. Muestra de 1 año de antigüedad (Se extrajo tanto desecho como suelo)
2. Muestra de 2 años de antigüedad (Se extrajo tanto desecho como suelo)
3. Muestra de 15 años de antigüedad sin bolsa (Se extrajo tanto desecho como suelo)

4. Muestra de 15 años de antigüedad con bolsa (Se extrajo un bolsa de basura que se encontraba cerrada, a pesar de ser desecho tan viejo)

En el caso de la cuarta muestra, se trataba de una zona donde no hubo correcta compactación y al llegar al sitio estaba expuesto un corte casi vertical que permitía tener acceso a desecho a unos 8m de profundidad.

Laboratorios utilizados

Las muestras de desecho fueron llevadas al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Y las muestras de suelo al Laboratorio Nacional Materiales y Modelos Estructurales.

Pruebas en el desecho

En el desecho se realizaron las pruebas de:

9. Sólidos Totales
10. Contenido de Humedad
11. Sólidos Fijos
12. Sólidos Volátiles
13. Medición de pH
14. Demanda Química de Oxígeno DQO
15. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO
16. Metales Pesados: Cd, Pb, Cu, Fe.

Con las pruebas anteriores fue posible la caracterización de los desechos.

- Para la prueba de sólidos totales se siguió el procedimiento convencional. Se determinó el peso de la muestra por diferencia, se horneó por 24 horas, y se volvió a pesar. Igual procedimiento se siguió para el contenido de humedad. Estas pruebas son un complemento de evaluación del material volátil y sólido en el desecho. Como material volátil están todas las sustancias que humidifican la muestra, esto puede reflejar evidencia de flujo interno de lixiviado, cercanía a la superficie, o edad del desecho. Por lo tanto, se espera que el material más asentado carezca de humedad, y se trate de un alto porcentaje de sólidos (un material mucho más densificado)
- La prueba de sólidos fijos y sólidos volátiles se realizó con el procedimiento típico, por diferencia

de masa después del horneado. La medición de los sólidos fijos y los volátiles corresponde a una estimación del contenido orgánico de las muestras, por lo que el material volatilizado corresponde al material que alimenta los procesos bacteriológicos, que a mediano plazo generan vacíos entre las partículas, responsables de una eventual disminución del volumen, por reacomodo de las mismas. Por otra parte, los sólidos fijos son señal de qué tan densificada está la muestra, importante detalle para estimar consolidación.

- La prueba de medición de pH, se hizo utilizando el phómetro en una disolución heterogénea entre agua destilada y muestra. La importancia del nivel de pH es conocer qué tan agradable o no es el ambiente del relleno para la digestión bacteriológica. Los procesos biológicos son los que provocan mayor asentamiento, por lo tanto conocer si es un ambiente adecuado o no para los microorganismos es importante.

- Para la prueba DQO se diluyó muestra de desecho y se puso a precalentar el digestor, mezclando los viales con el reactivo para el rango de 0 a 1500, en 2 ml de muestra. Luego, se preparó un blanco y se colocó, en conjunto con los otros viales en el digestor. Después de 2 horas en este equipo, se sacan los viales y se enfrían a temperatura ambiente, y por colorimetría se genera la lectura de la demanda química de oxígeno. El valor de DQO evidencia los contaminantes. Este dato permite evaluar el proceso de descomposición química que se da en un relleno, esperando que la DQO aumente conforme pasa el tiempo, señalando mayor de disposición de sustancias contaminantes, hasta que a cierta edad se vuelve constante.

- La prueba DBO se realizó por medio de las cabezas de medición de DBO Oxitop OC100. Igualmente, se preparó una disolución de desecho y se usaron dos pastillas de hidroxilo por muestra. Los resultados de esta prueba son importantes para determinar la cantidad de materia que se puede descomponer por medios biológicos, mide cuánta es la parte biodegradable de la muestra. Incluye lo que consumen microorganismos y contaminantes orgánicos.

- En el caso de los metales pesados, se evalúa su presencia con el fin de conocer qué tan contaminado está un relleno sanitario en el país. Por lo general, la toxicidad de los metales pesados es especialmente significativa los

primeros 15 años, siendo más capaz de contaminar al inicio de este periodo.

- Para el cálculo del hierro y el cobre se usó el método de la colorimetría. Comparando, una celda de agua destilada contra una muestra con desecho, agua destilada y el reactivo Hierro TPTZ ó el reactivo CU, según corresponda.

- Para la medición de cadmio o plomo se hizo mediante el equipo Metalyser HM 1000. Por el método convencional.

Pruebas en el suelo

Posteriormente, se le hicieron las pruebas al suelo del relleno. Para su caracterización, el suelo del relleno se trata igual en 3 muestras con tres edades distintas. Como se detalló previamente en esta sección. Cada una de estas muestras se analiza tres veces, en colaboración con el estudiante de Ingeniería Civil de la UCR Adrián Cárdenas.

Las pruebas realizadas fueron:

6. Humedad natural
7. Granulometría
8. Límites de Atterberg
9. Gravedad Específica
10. Clasificación SUCS

- Se determinan humedades naturales por diferencia de pesos y secado al horno. De acuerdo con ASTM D2216. Lo anterior permite evaluar el material una vez colocado en el relleno, específicamente su desempeño en la conducción de lixiviados y aguas pluviales. Se esperan muestras con bajo contenido de humedad, pues este es un relleno seco (sin recirculación).

- Se hace la curva granulométrica del suelo, según ASTM D422. Para esto, se utiliza el valor de porcentaje pasando cada malla. En este caso, se usó la malla de 3/8", #4, #10, #20, #40, #60, #100, #140 y la #200; mediante un tamizado manual.

- Los límites de Atterberg, por su parte se realizaron de acuerdo con la norma ASTM D-4318. La información aportada por esta prueba sirve para evaluar la plasticidad del material, y su reacción en presencia de agua. Como este suelo se pondrá de elemento impermeabilizante, la reacción a las variaciones de humedad es muy

importante de evaluar, pues la aparición de grietas debe evitarse a toda costa.

- La gravedad específica es un parámetro que se determina de acuerdo con la norma ASTM854-10, mediante el uso del picnómetro, usando la diferencia del peso de agua desplazado al agregar el contenido de sólidos. Y sacando la relación entre el peso de sólidos y el peso del agua.

- La clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS. Se utiliza la carta de plasticidad del método originalmente creado por Casagrande en el año 1942, y revisado en 1952, de conformidad con la norma ASTM D-2487.

Tanto las pruebas en el suelo como las de los desechos, se llevan a cabo con el fin de conocer con fundamento científico y a fondo los diferentes parámetros que se influyen en bajo o alto grado el comportamiento de la matriz suelo-desecho. Estos parámetros son los que se necesitan para poder proyectar asentamientos en la mayoría de los modelos aquí estudiados.

Selección del modelo

Tomando en cuenta 1) el nivel de influencia de cada factor investigado en la generación de asentamientos, 2) la localidad o universalidad de los parámetros utilizados en cada modelo y 3) la disponibilidad de información para alimentar cada ecuación es como se determinan los modelos más aplicables a la situación costarricense. A partir de ahí, se generaron los datos de asentamiento y la comparación con el método de cálculo del relleno Los Mangos. Es así como se evaluó la efectividad de los modelos y se arrojaron las conclusiones aquí descritas.

Rellenos Sanitarios y Costa Rica

La basura no desaparece. Necesariamente se pone en algún punto para reusarla o disponer de ella. Reduciendo las opciones al planeta, se cuenta con tres medios: aire, agua o tierra. Estos tres medios están interrelacionados (por ejemplo, lo que se pone en la tierra terminará, eventualmente, el agua). Por lo tanto, ¿qué se escoge? Un relleno sanitario (RS). Una forma de organización de residuos de las más comunes, usadas en el mundo entero. [Ref. 3]

Los RS son necesarios porque otras técnicas de manejo de desechos no son capaces de eliminar la totalidad del mismo (Ej: reducción de la fuente o reciclaje), o porque las técnicas por sí mismas producen residuos (por ejemplo incineración o tratamiento biológico). Claro está que los riesgos de su mal mantenimiento y/o creación son muy graves y potencialmente dañinos para el ambiente y los seres humanos.

Exactamente ¿qué es un RS? Es una estructura diseñada con el fin de reducir y controlar los efectos de desechos almacenados en un terreno. Implica la colocación del residuo con cierta geometría acompañado de logística de control diario.

A nivel mundial, las entidades más fuertes respecto a regulaciones en RS son The Environmental Agency en Reino Unido y la United States Environmental Protection Agency en Estados Unidos. A nivel nacional, el ente a cargo es el Ministerio de Salud Pública.

Reglamento de Rellenos Sanitarios

En Costa Rica, la herramienta legal más reciente usada por el Ministerio de Salud Pública se creó en 1998 y se llama Reglamento de Rellenos Sanitarios. Dicho reglamento define los RS como la *"técnica mediante la cual diariamente los desechos sólidos se depositan, esparcen,*

acomodan, compactan y cubren empleando maquinaria. Su fin es prevenir y evitar daños a la salud y al ambiente, especialmente por la contaminación de los cuerpos de agua, de los suelos, de la atmósfera y a la población al impedir la propagación de artrópodos y roedores." [Ref. 1]

Dentro de los requisitos de ese reglamento está que es obligatorio para los administradores de cualquier RS, entre otras cosas, cumplir con:

1. Cubrir diariamente los desechos con material inerte con un espesor mínimo de 15 cm.
2. Disponer de los desechos en capas de 60cm de espesor para su respectiva compactación.
3. Una densidad mínima en el desecho de 800 kg/m³.

Además, indica que la recirculación de lixiviados se hará sólo en época seca. Por otra parte, establece que los RS se clasifican en dos grupos, los manuales y los mecanizados; siendo la diferencia entre ellos el uso de maquinaria.

El mismo reglamento establece que al no existir un lugar especializado en el país para tratar residuos peligrosos, estos se deben tener en una celda separada dentro del mismo relleno.

Teoría de Rellenos Sanitarios

En el país, el primer RS creado fue el improvisado en Río Azul. Este nunca fue un RS propiamente dicho. Se trató, en sus inicios, de un botadero a cielo abierto, sin embargo, se declaró como RS en 1973. Ya para 1974 se empezaron a reportar problemas con el tratamiento de los desechos sólidos, pues una práctica propia de los RS como lo es la cobertura diaria del desecho no se daba, por lo tanto, pronto se convirtió en un botadero a cielo abierto. [Ref. 2]

Los RS requieren de una estructura capaz de mantener los gases y líquidos generados bajo control, para su adecuado

manejo. Dentro de las características mínimas debe contar con un sistema de colocación de desechos organizado, separando los tipos de residuos que entran al relleno, de acuerdo con su nivel de contaminantes, tendencia a la biodegradación y origen. Además, necesita estructuras para la salida de gases contaminantes, con el fin de evitar la acumulación de los mismos dentro del relleno y así el riesgo de explosión inherente. En su base, es primordial la máxima impermeabilización, evitando la salida de contaminantes en forma líquida. Esta combinación de sustancias se conoce como *lixiviado*. Dicha mezcla, producto de la descomposición y la precipitación debe ser recolectada en su totalidad, y transportada a una planta para su respectivo tratamiento. Lo anterior con el fin de disminuir el contenido tóxico a niveles aceptables y permitir la reintegración posterior al ambiente.

Tanto el lixiviado como el gas (mayoritariamente gas *metano*) producido en cualquier relleno representan una amenaza a la higiene y salud de la población, por esto deben ser extraídos y analizados. La revisión de estos productos permiten controlar el funcionamiento de las estructuras de drenaje, alertar sobre variaciones en las concentraciones de contaminantes y dependiendo de la calidad de la estructura de monitoreo, avisar sobre problemas puntuales de generación de tóxicos, hasta el punto de poder identificar la posición de la fuente contaminante.

Idealmente, y según las regulaciones federales estadounidenses, se debe tener un registro de quién trajo el desecho, qué tipo de desecho es, dónde se colocó y cuándo se colocó en el relleno; lo anterior con el fin de asegurar verdadera compatibilidad de los desechos. Y así prevenir reacciones entre ellos que puedan resultar en sobrecalentamiento, combustión o gases aún más tóxicos. [Ref. 3]

En general, el fin principal detrás del diseño de un RS está en controlar (1) la parte superior para minimizar las emisiones de gases además de la infiltración de lluvia y (2) la parte inferior para maximizar la recolección de lixiviados y minimizar el transporte de subterráneo de contaminantes. [Ref. 3]

Un relleno sanitario ideal es aquel que cuenta con lo mostrado en la figura 1:

- a) Una superficie totalmente impermeable, de arcilla que prevengan la contaminación del

suelo o del agua. Debe estar en todas las superficies en contacto con el terreno natural.

- b) Geosintético. Generalmente 180mm bentonita, actúa como una segunda capa que aísla el suelo de la contaminación.
- c) Una tercera superficie para aislar, esta vez geosintético tejido plástico.
- d) Una cuarta capa de arena que colabore a nivel global con el sistema de recolección de lixiviados.
- e) Un adecuado sistema de recolección de lixiviados. Requiere una capa geosintética de material tejido que sea capaz de proteger la tubería recolectora de fluidos.
- f) Grava en el fondo, para que este sea drenante, y colabore con la conducción de lixiviados.
- g) Maquinaria para compactar y acarrear los desechos sobre el relleno.

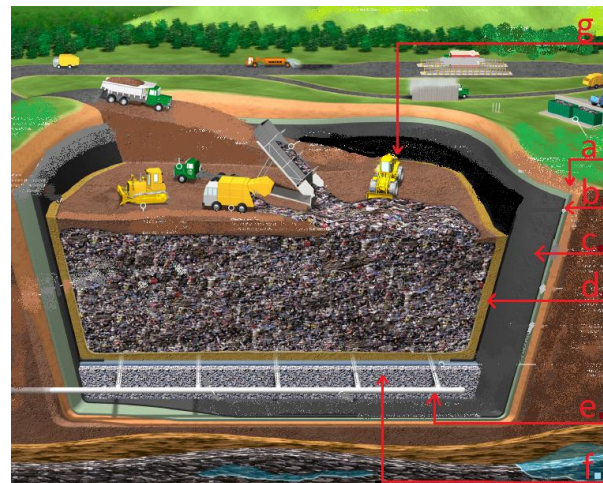


Figura 1. Ilustración de relleno ideal. Modificado de LaGrega (2001). [Ref. 3]

En un día normal de trabajo, el RS recibe cierto número de toneladas de desecho, dependiendo de la capacidad del relleno. Si este cuenta con la tecnología requerida, antes de que entre el camión se pesa la cantidad de basura que está entrando y se coloca en el punto designado para ese tipo de basura. En el punto de colocación, que se conoce como *celda*, está la maquinaria encargada de la compactación y acomodo del desecho. Este acomodo generalmente es en capas de grosor variable. Aunque según el Reglamento de Rellenos Sanitarios deben ser capas de unos 60cm. Al final del día, cuando se compacta con la *pata de cabro* la última capa, se cubre el relleno con material inerte, para reanudar

labores al día siguiente. Esta es la llamada *cobertura diaria*. En teoría, este material de cobertura diaria debe quedar ahí, pero algunos administradores de RS la remueven cada día, antes de reanudar labores, con el fin de maximizar el *espacio aire* disponible en el relleno.

A nivel internacional, los RS se pueden clasificar en dos grandes grupos: secos y húmedos. Como su nombre lo indica, la diferencia es que los húmedos tienen *recirculación de lixiviados*. Esto se hace con el fin de procurar fuentes de nutrientes continuas para las bacterias encargadas de la descomposición biológica del desecho. Los RS húmedos funcionan generalmente como bioreactores, históricamente se sabe que surgieron a partir de la idea de comercializar el metano generado con una mayor tasa de producción.

Los *bioreactores* son RS con niveles de humedad y oxígeno controlados, que se gradúan para incrementar la productividad de la actividad microbiológica. Más descomposición biológica implica disminución de masa, por lo tanto, generación de vacíos para el posterior asentamiento. Este reacomodo, que se explicará más adelante, trae consigo un incremento en el espacio aéreo para almacenar desecho. Por lo tanto, los bioreactores son RS que se espera ahorren alrededor de un 30% del espacio necesitado para colocar la basura. [Ref. 4]

Los Bioreactores son considerados tecnología relativamente nueva. Siguen en etapa de prueba y estudio. Por su alto contenido de humedad, son poco estables. Experimentan un incremento en el peso que exige más esfuerzo de la estructura del fondo y su soporte. Respecto a esto, hay experiencias internacionales de bioreactores que por este fenómeno colapsan sobre sí mismos. [Ref. 5]

Situación actual de los RS

Los RS están ubicados en todo el territorio nacional y su funcionamiento se limita a razones económicas y la conveniencia del terreno. Debe considerarse que no toda la basura va a un RS. Ni las mismas autoridades tienen certeza de los botaderos no controlados. De esta forma Costa Rica cuenta con cantones como San José, Belén,

Montes de Oca, Moravia, Garabito, Escazú, Santa Ana, Tibás y Curridabat que sobresalen con mayor inversión en el depósito de residuos sólidos en RS. Para estos cantones, la inversión oscila entre los 10 000 y los 18 000 colones por habitante por año. Por el contrario, dentro de los cantones de menor inversión anual por habitante está Atenas (1 700 colones), además de Alajuelita, Santa Bárbara, Desamparados, La Unión, Poás, Paraíso y Oreamuno. Claro está, que la inversión de los cantones que envían sus desechos a botaderos o vertederos "controlados" invierten mucho menos (Los Chiles por ejemplo, 282 colones). [Ref. 6]

Estos datos evidencian una verdad sobre los RS: Son inversiones muy altas. No todos los municipios del país están en capacidad de enfrentar tal inversión inicial. (Sólo aquellos con suficiente población pueden disponer del 100% de desechos en un relleno). Ver gráfico 1.

En mayo del 2010 se aprobó la Ley de Gestión de Residuos Sólidos. En ella se define al Ministerio de Salud Pública como ente encargado y regulador del manejo de residuos sólidos. De acuerdo con esta legislación no son aceptados los botaderos a cielo abierto, ni los vertederos incontrolados. Sin embargo, las autoridades reconocen que esta es una práctica muy extendida. Las órdenes de cierre emitidas por esta institución son revocadas después de algún tiempo, en el cual el problema de salud ambiental crece hasta que el propio Ministerio acepta volver a abrir el botadero, con algunas medidas de mitigación. [Ref 6.]

La actual solución ante este problema es la creación de celdas transitorias (duran aproximadamente 2 años) mientras el botadero se modifica con el fin que de cumpla con los requerimientos de ley. [Ref 6.]. Sin embargo, el modelo de trabajo en función de las urgencias y no de las prioridades sigue rigiendo el sistema de organización municipal-nacional que está relacionado a los residuos. Los datos revelados en el Decimosexto Informe del Estado de la Nación evidencian esta realidad.

En el año 2007 se evalúa el estado de los RS del país. El gráfico siguiente presenta una comparación entre la capacidad instalada y la capacidad necesaria para la disposición final de desechos de ese año.

Comparación entre "capacidad instalada" y "capacidad necesaria" (ton)

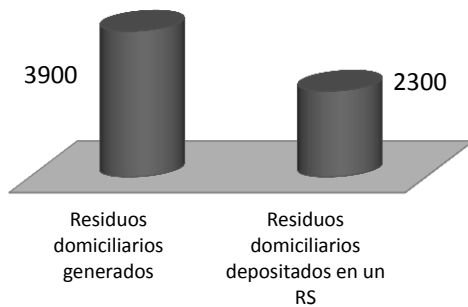


Gráfico 1. Comparación en toneladas de residuos generados y la cantidad almacenada en un RS. [Ref. 3]

Consecuencias de los RS

Porqué nadie quiere tener un RS cerca? Las razones que explican el fenómeno NIMBY (Not In My Back Yard) son numerosas. Lastimosamente el historial sobre mal manejo de RS en Costa Rica incluye problemas de contaminación visual y paisajística, afectación de ecosistemas aledaños y descomposición de materia biodegradable en sistemas sin oxígeno. Esto es especialmente dañino porque los gases producto de dicha descomposición funcionan como gases de efecto invernadero. De hecho, tienen un potencial de calentamiento 56 veces mayor al del carbono. [Ref. 7]. Son estas mismas sustancias las responsables del mal olor. Además, contribuyen en alguna medida a la generación de *smog* y de la lluvia ácida. [Ref 7] El funcionamiento de los RS y la incineración de residuos sólidos representan el 2.8% de los gases de efecto invernadero producidos. Los principales gases que participan aquí son el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4).

Para ponerlo en perspectiva, nuestro país no representa una amenaza como fuente de contaminación para el resto del mundo. En realidad, entre todos los países de Centroamérica no se produce ni un 0.5% de las emisiones de gas invernadero mundial. El problema es que los efectos de la contaminación mundial (como el efecto invernadero) sí repercuten fuertemente en

el istmo centroamericano. Por constituir este un *punto caliente*. (zona donde del efectos del calentamiento global son más severos) [Ref 6]

Los RS además son caros para la población. No sólo porque representan una gran inversión inicial, sino también porque los costos ambientales como la contaminación de las aguas por percolación y escorrentía son prueba de ello.

En RS la proliferación de mosquitos, moscas, aves de carroña y otros animales es común. De ahí la facilidad de generación de enfermedades. Otra arista del problema de los RS es la afectación a las actividades inmobiliarias. Además, también comprometen la infraestructura (tanto dentro como fuera del RS), son un contaminante del suelo durante la operación y sucesivos años después del cierre.

El Decimosexto Informe del Estado de la Nación explica la costumbre de depositar materiales peligrosos y patogénicos en los diferentes rellenos o botaderos, dando lugar a una dispersión de contaminantes. Tal es el problema, que enfermedades como la leptospirosis han reaparecido. Además este informe explica el riesgo de contaminación en aguas subterráneas con sustancias tóxicas y la facilidad de inundación debido a la saturación de desechos en drenajes. [Ref 7]

RS como solución al tema de la basura

Si tantas son las consecuencias de los RS, ¿porqué se siguen usando?. Porque sí funcionan. Bien administrados, con suficiente inversión y control, son una solución relativamente "limpia" a las toneladas de basura que contrario a desaparecer, están aumentando.

Los desechos generados inevitablemente aumentan conforme crece la población, y un lugar con la adecuada ingeniería es lo mínimo que se debe hacer para cuidar el medio ambiente y a la humanidad de los efectos adversos. No hay en un futuro próximo una solución factible que evite la práctica del RS.

Asentamientos en RS

Cuando un punto de la superficie del RS reduce su elevación, se dice que está sufriendo *asentamientos*. La variación depende tanto del tiempo como de la profundidad del relleno.

Conocer la tasa de asentamiento de un RS es de vital importancia para calcular la vida útil del mismo. Por otra parte, permite prevenir daños a estructuras internas como recolectores de lixiviados, recolectores de gases, capas de impermeabilización en el fondo y pozos de recolección, que se vean comprometidas por la acción de estos asentamientos.

Los asentamientos excesivos pueden producir fracturas en el sistema de cobertura final. Esto traería consigo la salida directa de contaminantes a la atmósfera.

Como los asentamientos son a corto y a largo plazo, es posible predecir, bajo ciertas circunstancias, y con cierto grado de incertidumbre, cuánto se reducirá un volumen de basura por consolidación. Cuando una capa de un RS se compacta, se inicia un proceso en el que el agua comienza a desplazarse debido al gradiente producido por las sobrepresiones intersticiales, variando el volumen de la matriz suelo-desecho. Si las sobrepresiones intersticiales son positivas, de forma que el suelo empieza a reducir su volumen, se dice que está sufriendo el proceso de *consolidación*. La consolidación no sólo implica la migración del agua, también implica reducción de vacíos.

Para entender la consolidación, que es el proceso que produce los asentamientos, debe conocerse el concepto de *esfuerzo efectivo*. Este es el esfuerzo soportado por las partículas sólidas, no por los vacíos ni por los poros llenos de agua o líquido.

Entonces, para que un relleno reduzca su volumen permanentemente, necesariamente tiene que reacomodar partículas. Algunas de ellas se deforman. Las deformaciones que puede sufrir el relleno son elásticas, plásticas o ambas, en cualquier orden.

Será una deformación elástica cuando, después de aplicar una carga de compactación, se recupera la forma y dimensiones originales. Sin embargo, la plástica será cuando al retirar la carga, no se regresa a la forma original. Pero, hay un caso de deformación que es de especial interés en un RS. Se llama *deformación compresiva*. En este fenómeno sí se da la reducción de volumen en el relleno, pues la deformación permanece y se da un *reacomodo* de partículas. Es aquí donde aparece la consolidación.

Cabe aclarar que tanto la consolidación como la compresión son fenómenos de reducción de volumen, la diferencia entre uno y otro radica en la presencia del agua y del tiempo. En términos más específicos, la consolidación es la reducción de volumen en masas saturadas, con dos fases: primaria y secundaria. La *compresión*, por su parte es la reducción del volumen por densificación dinámica en capas, con periodos de tiempo mucho más cortos.

En los rellenos sanitarios se provoca la compresión por capas con un equipo comúnmente llamado *pata de cabro*, esto puede durar unas horas. En cambio, los asentamientos producidos por consolidación es un proceso de años que no requiere necesariamente de un equipo especial para que ocurra.

La consolidación primaria se da cuando la reducción de volumen se debe a la salida de líquido en la masa de suelo o desechos. Cuando el agua sale, los esfuerzos se transfieren, pasan de ser tomados por el agua a ser tomados por las partículas sólidas. Por lo tanto, la consolidación primaria ocurre inmediatamente después de la colocación de la basura, por procesos físicos y mecánicos. En la consolidación secundaria el reajuste se da en la parte sólida, cuando la carga está soportada por el esfuerzo efectivo. Aquí el asentamiento adicional corresponde a la acción de los procesos químicos y biológicos.

Fases del proceso de asentamiento en RS

El comportamiento de los asentamientos en los rellenos sanitarios comprende 5 etapas, que se dan como sigue:

1. Compresión física y flujo plástico por la distorsión mecánica, doblamiento, choque y reorientación de partículas.
2. Asentamiento no uniforme debido a la migración de pequeñas partículas a los vacíos entre a las grandes partículas.
3. Comportamiento viscoso y fenómeno de consolidación que involucra tanto el esqueleto sólido como las partículas o sus componentes.
4. Asentamiento por descomposición debido a la biodegradación de los componentes orgánicos.
5. Colapso por procesos físico-químicos (corrosión, oxidación, degradación de componentes inorgánicos). Deformación residual.

El diagrama siguiente las ilustra:

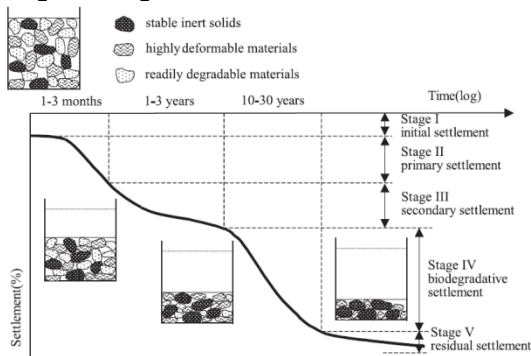


Figura 2 . Diagrama de asentamientos en el tiempo. Según Bowders et al. (2000) [Ref 8]

Según Bowders (2000) [Ref. 9] las primeras 3 etapas, y posiblemente la 4ta, sean función del peso del desecho, y su sobrecarga mayoritariamente. Por lo tanto, y cómo es lógico, habrá mayor asentamiento en las partes más profundas del relleno, mientras que las capas superiores estarán sólo comprimidas por la compactación aplicada con maquinaria si es el caso.

El asentamiento final tiene un comportamiento irregular. Sin embargo el inicial, como es fácil de imaginar, es activado por el peso propio de la basura o las cargas de compactación

a las que se someta el desecho. Debe aclararse que no es lo mismo los asentamientos inducidos por carga mecánica que los asentamientos independientes de la basura en sí.

Mecanismos de asentamiento

Mecanismos que causan grandes asentamientos

a. Compresión Primaria ó Compresión Mecánica

Este mecanismo de compresión se da por la distorsión, el doblado, el choque y la reorientación de los materiales provocada por el peso del desecho mismo. Según estos autores [Ref 10], el proceso de compresión primaria tarda típicamente un mes a partir del momento en que el llenado termina. Según Bowders (2000) va de los diez a lo noventa días. Sin embargo, ambos autores coinciden en que la compresión primaria depende del tipo de desechos, la geometría de llenado, la densidad del relleno y su método de operación. [Ref 10.]

b. Biodegradación

Corresponde a los procesos tanto aerobios como anaerobios de descomposición del material por las bacterias. El mecanismo primario de biodegradación se da cuando se descompone la celulosa sin presencia de oxígeno. Aquí las bacterias convierten los materiales sólidos hechos a base de carbón y el agua en dióxido de carbono y metano. Según diferentes autores como Ranguette et al (1989), Watts y Charles (1990) y Huitric (1981) el mayor asentamiento en un relleno sanitario se da por este proceso. [Ref 10.]

c. Compresión por flujo plástico (incluyendo el llenado de vacíos)

Esta es la forma de asentamiento que es causada por (1) la erosión y el acarreo de partículas finas a los vacíos presentes entre las partículas grandes; (2) el material que se mueve a los vacíos producto de la biodegradación, y (3) la continuación de la compresión elástica. El llenado de vacíos corresponde parcialmente al debilitamiento en la capacidad soportante del suelo por fenómenos como la biodegradación y la corrosión. Por lo tanto, la rigidez de los RS se va disminuyendo con el tiempo. Según los autores Watts y Charles (1990) esta forma de asentamiento representa el 2% de la altura del relleno en un ciclo logarítmico de tiempo. [Ref 10.]

Mecanismos que causan pequeños asentamientos

a. Fenómenos físico-químicos

En este mecanismo entra la corrosión del acero y la combustión de productos orgánicos.

b. Interacción

Aquí entra la reacción entre el metano y la combustión, la combustión espontánea y los ácidos orgánicos causando corrosión. Está supeditado a otros mecanismos de asentamiento, pues en realidad por sí mismo este mecanismo no genera asentamientos significativos. Puede ocurrir en asentamientos grandes pero en zonas localizadas, y está condicionada a la presencia de oxígeno. Según Leonard et al. (2005) [Ref 10.]

c. Consolidación

El asentamiento por consolidación es aquel generado por el agua sobrante en el relleno. Pues al incrementar la presión de poro y el líquido salir, deja espacios vacíos que luego se pueden ocupar, densificando el relleno.

De los mecanismos anteriores se puede ver que, durante la bioconsolidación, se da una reducción directa de sólidos, aumentando la tasa de asentamiento. Por el contrario, si no hay suficiente material orgánico capaz de degradarse, la consolidación será más lenta. Sin embargo, el proceso de degradación está siempre condicionado a condiciones de humedad y operación del relleno. Según Leonard et al. (2005) [Ref 10.]

De hecho, los rellenos sanitarios contienen típicamente de un 22% a un 26% de su peso en material degradable biológicamente, según La Administración de Desechos Sólidos de Estados Unidos de Norte América SWANA, por sus siglas en inglés. (1991). [Ref 6] Cuando este porcentaje se descompone, se crean vacíos, estos serán los mismos que hacen el relleno reducir el volumen, con ayuda de la sobrecarga del desecho sobre ellos.

La consolidación primaria puede reducir hasta en un 40% la altura del relleno, según Frantzis (1991). [Ref 10.] Sin embargo, este rango puede variar según el tiempo de reposo que tenga la basura colocada o el grado de compactación aplicado. Este es el principal mecanismo de asentamiento de corto plazo.

En resumen, los mecanismos de consolidación se pueden diagramar como sigue:

Cuadro 1. ASENTAMIENTO Y SUS GENERADORES PRINCIPALES	
ASENTAMIENTO	CAUSANTE
Alta	Biodegradación
Moderada	Compresión por flujo plástico
Baja	Fenómenos físico-químicos
Baja o Alta Concentrada	Interacción
Baja o Nula	Consolidación

Adaptado de Leonard (2005) [Ref 10.]

Como lo indica la tabla anterior, para efectos de asentamientos, son primordiales los provocados por el mecanismo de la biodegradación y el de compresión por flujo plástico. Este último es asociado con la deformación elástica del material inerte que queda mientras la biodegradación ocurre.

Recirculación de lixiviados y asentamientos en el relleno:

La recirculación de lixiviados también tiene su porcentaje de participación en el asentamiento de un relleno. De esta forma, según Bowders (2000) [Ref. 9] y sus mediciones experimentales, la recirculación de lixiviados procuró los asentamientos más significativos, que a su vez se relacionaron con las temperaturas más elevadas. Precisamente, la biodegradación es el proceso que se acelera con la re-circulación de las sustancias generadas por los desechos.

Puede observarse en el gráfico siguiente las mediciones de asentamientos hechas en el relleno sanitario Victoria, Australia donde la recirculación de lixiviado, o el relleno húmedo (bioreactor) incrementa notoriamente la posibilidad de acomodo de los desechos.

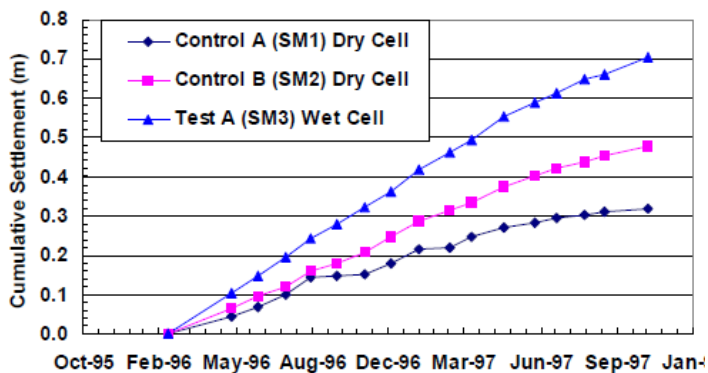


Gráfico 2 . Diferencia entre el asentamiento acumulado en una celda seca y una húmeda. Tomado de Bowders (2000). [Ref. 9]

El gráfico 6 muestra que en el RS Victoria, Australia, el asentamiento en la celda con recirculación de lixiviados se asentó de 1.5 a 4.5 veces más que la celda seca.

Factores influyentes en el asentamiento de un RS

- Temperatura
- Precipitación
- Altura del relleno
- Recirculación o ausencia de ella
- Tipo de residuos
- Contenido orgánico
- Humedad
- Compactación
- Densidad
- Compresibilidad
- Nivel de pH

Calcular los asentamientos de los rellenos sanitarios es un asunto complejo. Se ve determinado por el tipo de basura que llega al relleno, por lo que entre más heterogénea mayor imprecisión en los cálculos. Cada tipo de desecho tiene su propia capacidad de deformarse o reacomodarse en el relleno, además, aspectos como el asentamiento diferencial que puede ocurrir en el suelo donde se instala el relleno, la eficiencia bacteriológica presente o la geometría de llenado son factores a tomar en consideración cuando se pretende modelar un RS para calcular sus asentamientos. Por otra parte, la densidad de los residuos, el método de operación del relleno, la humedad y precipitación, influyen en el proceso de consolidación.

Modelado de Asentamientos en RS

El modelado de asentamientos en RS requiere de una larga medición de asentamientos previos a través del tiempo. La medición directa de asentamientos es comúnmente realizada con placas, y con sus respectivas diferencias de elevación en un periodo definido de tiempo. A partir de estos datos es como se genera una ecuación que le permite modelar asentamientos.

Como es lógico, el modelado implica datos de campo, y sólo con dichos datos es posible esperar verdadera precisión.

El modelado de RS usó como base la mecánica de suelos. Y al igual que en los suelos, el asentamiento no es el mismo en todos los puntos. Parte del reto de los modelos aquí usados es poder aproximar el asentamiento promedio de un montón de puntos que cada uno experimenta distinta tasa de asentamiento, debido a los factores ya señalados.

A continuación se muestran los modelos de asentamiento que se evaluaron en este proyecto. Se clasifican en modelos basados en la mecánica de suelos, en la reología, modelos empíricos y modelos que incorporan biodegradación.

Modelos basados en la mecánica de suelos

1. Modelo de Sowers (1973)

Sowers fue de los primeros en proponer una comparación entre el comportamiento de los suelos compresibles y el desecho. Dicha comparación se limita a condiciones oedométricas (deformación vertical pura). Sowers considera una columna de desecho suficientemente alejada de los bordes de la celda del relleno, a partir de la semejanza entre el asentamiento de la turba y el del desecho. Posteriormente Edil et al (1990) [Ref. 21]

confirma que el desecho tiene un comportamiento semejante al de los suelos orgánicos. Sin embargo, el comportamiento de un relleno sanitario es heterogéneo y anisotrópico, por lo tanto más difícil de caracterizar que los suelos. Así fue como Sowers determinó la relación de esfuerzo-deformación dependiente del tiempo que se describe a continuación:

$$S = H C_c^* \log \left(\frac{P_o + \delta P}{P_o} \right) + H C_{\alpha 1} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right)$$

Ecuación 1. Modelo de Sowers (1973). [Ref. 21]

Donde:

S(m): Asentamiento primario y secundario en la capa en consideración.

H(m): Espesor inicial de la capa.

C_c^* : Coeficiente de compresión primaria.

($C_c^*=0.163-0.205$)

P_o (N/m²): Presión de sobrecarga existente actuando en la mitad de la capa.

δP (N/m²): Incremento de presión de sobrecarga en la mitad de la capa, a partir de la colocación de la capa siguiente *

$C_{\alpha 1}$: Coeficiente de compresión secundaria. ($C_{\alpha 1}=0.015-0.350$)

t_1 (días): Tiempo de inicio de la compresión secundaria.

t_2 (días): Final del periodo de tiempo en que se quiere medir el asentamiento.

*Es asumida una transferencia del 100% de la presión de sobrecarga de la capa construida con la capa en análisis. Los valores de las tasas de compresión determinados según Babu et al. (2010). [Ref 21]

2. Modelo de Bjarngard y Edgers (1990)

Se trata de una versión extendida del modelo de Sowers. Bjarnard y Edgers dividieron la

compresión secundaria en dos sub fases, a través del ajuste de dos líneas rectas. Fue así como introdujeron el coeficiente intermedio de compresión secundaria y el coeficiente final de compresión secundaria. Como sigue:

$$S = H C_c^* \log \left(\frac{P_o + \delta P}{P_o} \right) + H C_{\alpha 1} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) + H C_{\alpha 2} \log \left(\frac{t_3}{t_2} \right)$$

Ecuación 2. Modelo de Bjarngard y Edgers (1990). [Ref. 21]

Donde:

S(m): Asentamiento primario y secundario en la capa en consideración.

H(m): Espesor inicial de la capa.

C_c^* : Índice de compresión primaria. ($C_c^*=0.205$)

P_o (N/m²): Presión de sobrecarga existente actuando en la mitad de la capa.

δP (N/m²): Incremento de presión de sobrecarga en la mitad de la capa, a partir de la colocación de la capa superior *

$C_{\alpha 1}$: Índice intermedio de compresión secundaria. ($C_{\alpha 1}=0.035$)

$C_{\alpha 2}$: Índice de largo plazo de compresión secundaria. ($C_{\alpha 2}=0.215$)

t_1 (días): Tiempo de compresión inicial. ($t_1=1-25$)

t_2 (días): Tiempo de compresión primaria. ($t_2=200$)

t_3 (días): Tiempo total en evaluación. [Ref 21]

3. Modelo de Hossain y Gabr (2005)

Este es un modelo que considera el asentamiento de largo plazo con tres términos. Sin embargo, el modelo no considera la compresión mecánica al someter a un esfuerzo ni la presión del peso propio del suelo-desecho. Al igual que muchas otras de las ecuaciones mostradas aquí, esta surge a partir de los resultados experimentales. El grado de descomposición fue caracterizado con las tasas de generación de gases más la proporción de celulosa a lignina. Los cuatro factores de tiempo para la compresibilidad se determinaron a partir de la curva de producción de gas que se generó en el experimento. El modelo se da como sigue:

$$\frac{\Delta H}{H} = C_{\alpha i} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) + C_{\beta} \log \left(\frac{t_3}{t_2} \right) + C_{\alpha f} \log \left(\frac{t_4}{t_3} \right)$$

Ecuación 3. Modelo de Hossain y Gabr (2005). [Ref. 21]

Donde:

ΔH (m): Cambio en la altura del relleno.

H(m): Altura del relleno.

$C_{\alpha i}$: Índice de compresión, como función del nivel de esfuerzo y grado de descomposición.

($C_{\alpha i}=0.03$)

C_{β} : Índice de biodegradación. ($C_{\beta}=0.19$)

$C_{\alpha f}$: Índice de flujo plástico. ($C_{\alpha f}=0.022$)

t_1 (días): Tiempo para que se complete la compresión inicial. ($t_1=10-15$)

t_2 (días): Duración durante la cual se evalúa el asentamiento. ($t_2=100-2000$)

t_3 (días): Tiempo de compresión de la compresión biológica. ($t_3=3500$)

t_4 (días): Tiempo para el flujo plástico y la biodegradación. ($t_4=0$)

[Ref 21]

Modelo basados en la reología

4. Modelo de Gibson y Lo (1961)

Los modelos reológicos son modelos mecánicos basados en elementos como resortes, deslizadores y otras piezas. Consisten en construcciones empíricas para el estudio del flujo del material en estudio. Los autores Gibson y Lo han publicado un modelo que fue ampliamente aceptado en su momento. Su creación fue para el estudio de los suelos con alto contenido orgánico. Sin embargo, Edil et al. (1990) lo adoptó para el estudio del asentamiento total en rellenos sanitarios. El modelo de Gibson y Lo consiste en una correlación entre la compresión de un resorte y el asentamiento inmediato, mientras que la combinación de un pistón y un resorte se relacionan con la deformación del material. Un esquema del modelo se presenta a continuación:

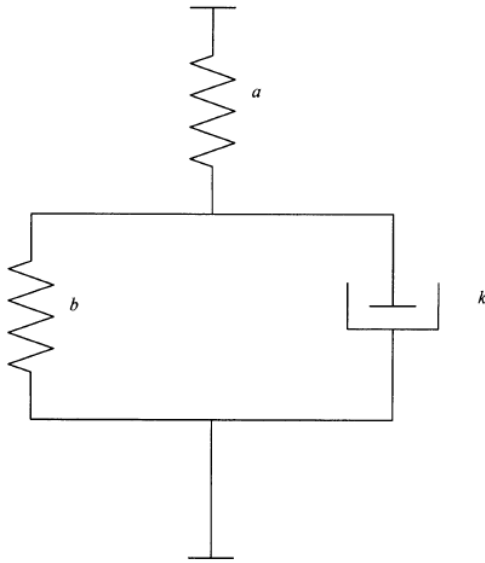


Figura 3. Diagrama modelo reológico de Gibson y Lo. Modificado de Babu et al (2010) [Ref. 21]

En el esquema anterior, se puede observar cómo el resorte "a" reflejará el asentamiento inmediato del desecho. Con el tiempo, las partículas más resistentes fluirán, de manera que un nuevo acomodo permitirá continuar con el asentamiento. Este último será a una tasa "k", visible también en el estiramiento del resorte "b".

La ecuación que describe ese modelo es:

$$\varepsilon(t) = \sigma' \{a + b(1 - \exp(-kt))\}$$

Ecuación 4. Modelo de Gibson y Lo (1961). [Ref. 21]

Sin embargo, según Hettiarachchi (2005) [Ref 21] este modelo no es preciso. Existe una relación no lineal entre "a" y "b" con el esfuerzo efectivo. Debido a esta relación no lineal y la variación del esfuerzo efectivo con la profundidad, el modelo es confiable en los rangos de esfuerzo dados y en el espesor de capa en que los parámetros fueron determinados. Es por esto que el modelo reológico sólo se menciona, pero no se hará uso de él en este proyecto.

Modelos empíricos

1. Función logarítmica de Yen y Scanlon (1975)

Corresponde a una ecuación generada a partir de tres rellenos diferentes, con 30m de altura e información recopilada durante 9 años. La tasa de asentamiento fue calculada como la razón de cambio de elevación de placas de asentamiento respecto a un lapso de tiempo.

$$\Delta H = H_f \left[\alpha + \beta \log\left(t - \frac{t_c}{2}\right) \right]$$

Ecuación 5. Modelo de Yen y Scanlon (1975) (1)

Donde:

ΔH (m): Asentamiento.

H_f (m): Altura inicial del relleno.

α : Parámetro de acomodo. (Donde $\alpha = 0.00095 \cdot H_f + 0.00969$)

β : Parámetro de acomodo. (Donde $\beta = 0.00035 \cdot H_f + 0.00501$)

t (días): Tiempo desde el inicio de llenado

t_c (días): Tiempo de construcción de la capa.

($t_c = 30$)

Una versión alternativa de este modelo la presentan los autores Ling et al (1998). Se presenta como:

$$\Delta H = m - n \log(t)$$

Ecuación 6. Modelo de Yen y Scanlon (1975) (2). [Ref. 21]

El limitante de este modelo se presenta al agrandar t. Pues si se agranda t, el cambio en alturas será negativo, lo que indicaría que el relleno se está hinchando. Por lo que, para efectos prácticos t debe ser tan grande hasta que el asentamiento sea cero. Exactamente, $t_{m\acute{a}x} = m/n$. [Ref 21]

2. Modelo del flujo plástico de Edil et al. (1990)

Es una relación simple de deformación y esfuerzo constante dependiente del tiempo. Se da como sigue:

$$\Delta H = H_o \Delta\sigma M' \left(\frac{t}{t_r}\right)^{N'}$$

Ecuación 7. Modelo de Edil et al. (1990). [Ref. 21]

Donde:

ΔH (m): Asentamiento.

H_o (m): Altura inicial del relleno.

$\Delta\sigma$ (N/m²): Esfuerzo de compresión dependiente de la altura del desecho, densidad y carga externa.

M' : Compresibilidad de referencia (De 1.06×10^{-5} a 5.8×10^{-5} kPa)

N' : Tasa de compresión (De 0.50-0.67)

t (días): Tiempo desde la aplicación de carga.

t_r (días): Tiempo de referencia. *

*El tiempo de referencia es 1 para hacer el tiempo adimensional. Con el uso de este modelo de asentamiento los investigadores El-Fadel et al (1999) aconsejan una compresibilidad de referencia M' de 1.7×10^{-5} /kPa y una tasa de compresión de 0.50. [Ref 21]

3. Modelo de la función hiperbólica de Ling et al. (1998)

Este modelo representa el asentamiento del relleno en caso de que se sepa el asentamiento final alcanzado. Además, la tasa inicial de asentamiento es un dato de entrada ($=0.001$ m/día). La función hiperbólica ofrece la posibilidad de empezar en cualquier momento. La ecuación se da como sigue:

$$\Delta H = \frac{t}{\left(\frac{1}{\rho_0}\right) + \left(\frac{t}{S_{ult}t}\right)}$$

Ecuación 8. Modelo de Ling et al. (1998). [Ref. 21]

Donde:

ΔH (m): Asentamiento.

ρ_0 (m/día): Tasa inicial de asentamiento ($\rho_0=0.001$)

S_{ult} : Asentamiento final alcanzado

t (días): Tiempo desde la aplicación de carga.

[Ref 21]

4. Modelo de la ecuación de atenuación de Coumoulos y Koryalos (1997)

Este modelo asume que el asentamiento de un relleno sanitario puede ser aproximado por una línea recta, como función del logaritmo del tiempo. Aquí la precisión de la tasa anual de asentamiento dependerá de la precisión del coeficiente de compresión secundaria. Se puede expresar como:

$$Y = \frac{0.434 C'_\alpha}{t_{c*} + (t/2)}$$

Ecuación 9. Modelo de Coumoulos y Koryalos (1997). [Ref. 21]

Donde:

Y (pocentaje/mes) ó (porcentaje/año): Tasa anual o mensual de asentamiento

C'_α : Coeficiente de compresión secundaria.

t_{c*} : Tiempo de llenado. Se asume 1 mes.

t : Tiempo transcurrido en el mes.

[Ref 21]

Modelos que incorporan biodegradación

5. Modelo de Park y Lee (1997)

Aquí la tasa de asentamiento es asumida como directamente proporcional a la cantidad de sólidos solubilizados. Aquí se asume que la compresión mecánica sigue un modelo lineal de logaritmo del tiempo versus deformación. El modelo se puede expresar como:

$$\varepsilon(t)_{mec} = C_\alpha \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) +$$

$$\varepsilon(t)_{dec} = \varepsilon_{tot_dec}(1 - e^{-k_1 t})$$

Ecuación 10 (a,b). Modelo de Park y Lee (1997). [Ref. 21]

Donde:

Asentamiento (m): $\varepsilon_{mec} + \varepsilon_{dec}$ (Deformación total por compresión)

C_{α} : tasa de compresión secundaria. ($C_{\alpha}=0.005$)

t_2 (días): Tiempo desde el inicio de la descomposición hasta el final del periodo de estudio

t_1 (días): Tiempo desde el inicio de la descomposición

ε_{tot_dec} (%): compresión total que ocurrirá por biodegradación. (6.65%)

k (constante/tiempo): Tasa de deformación de primer orden. ($k=2.06/año$ ó $0.005643/día$)

Básicamente, todos los modelos que incorporan biodegradación se apoyan en que la compresión es proporcional a la biodegradación dada. Para la creación de estos modelos la biodegradación es expresada en términos de cinética de primer orden. [Ref 21]

6. Modelo de Hettiarachchi et al. (2009)

Como otros modelos, este basa el estudio de asentamientos en la observación de *cambios de volumen*. Hettiarachchi et al asumen la cinética de primer orden como la capaz de modelar el asentamiento por degradación. Por esto, describen el asentamiento total como un proceso combinado, de compresión mecánica $(\Delta H)_m$ y asentamiento por biodegradación $(\Delta H)_b$. Lo anterior debido a que el relleno cambia su volumen debido al peso propio de la carga que actúa en él, y experimenta pérdida de masa por la biodegradación. Este modelo busca además considerar la heterogeneidad del desechos clasificando el mismo en 4 grupos: *no degradable*, *poco degradable*, *moderadamente degradable* y *altamente degradable*. Haciendo uso del siguiente esquema idealizado, y asumiendo que la compresión se da en capas horizontales, Hettiarachchi et al crearon el modelo aquí expuesto.

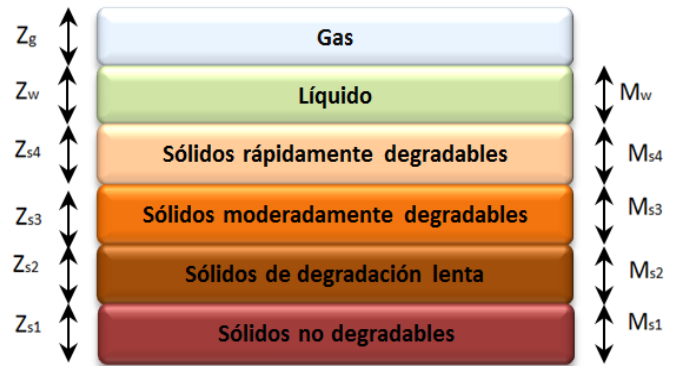


Figura 4. Diagrama de fases. Modelo de Hettiarachchi et al (2009) [Ref. 21]

El modelo es:

$$(\Delta H)_m = H_i \left[\frac{M_{si}}{\rho_w} \sum_{j=1}^4 \frac{f_{sj}}{G_{sj}} (1 - e^{-\lambda_j t}) \right]$$

$$(\Delta H)_b = H_i C^* \log \left(\frac{\sigma' + \Delta \sigma'}{\sigma'} \right), C^* = \begin{cases} C_c^*; \Delta \sigma' > 0 \\ C_s^*; \Delta \sigma' < 0 \end{cases}$$

$$H_f = H_i - (\Delta H)_b - (\Delta H)_m$$

Ecuación 11(a,b,c). Modelo de Hettiarachchi et al. (2009). [Ref. 21]

Donde:

H_i (m): Altura inicial. (Denotado con Z en el esquema anterior.)

M_{si} (kg): Masa.

ρ_w (kg/m³): Densidad del agua

f_{sj} : Fracción inicial de sólidos para cada grupo de desecho. ($f_{sj}=0.15-0.35$)

G_{sj} : Gravedad específica del *joteavo* (en función de "j", no de "n") grupo de desecho. ($G_{sj}=1-3$)

λ_j (día⁻¹): Constante de degradación cinética de primer orden para el *joteavo* grupo. ($\lambda_j=0 - 0.001/d$) La constante de degradación para desecho no degradable es cero.

t (días): Tiempo de análisis de asentamiento.

C^* : Parámetro de compresibilidad. ($C^* = 0.174-0.205$)

σ' (N/m²): Esfuerzo efectivo.

$\Delta\sigma'$ (N/m²): Cambio en el esfuerzo efectivo.

[Ref. 21]

7. Modelo de Marques (2001)

Aquí, la degradación es considerada dentro de los mecanismos de compresión primaria y secundaria, mediante parámetros reológicos. Aquí la compresión primaria se observa como un fenómeno inmediato, independiente del tiempo. Lo anterior se basa en el comportamiento lineal de la compresión primaria en las curvas de relación de vacíos como función del logaritmos del esfuerzo efectivo. El modelo se expresa como:

$$\frac{\Delta H}{H} = C'_c \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) + \Delta\sigma b (1 - e^{-ct'}) + E_{dg}(1 - e^{-dt''})$$

Ecuación 12. Modelo de Marques. (2001). [Ref. 21]

Donde:

ΔH (m) : Asentamiento.

H (m): Altura inicial del desecho.

C'_c : Tasa de compresión primaria. ($C'_c=0.106$)

σ_0 (N/m²): Esfuerzo inicial

$\Delta\sigma$ (N/m²): Incremento en la presión de sobrecarga actuando en el medio de la capa.

b : Coeficiente de compresión mecánica secundaria. ($b=5.72 \times 10^{-4}$)

c : Tasa de compresión secundaria mecánica. ($c=1.79 \times 10^{-3}$)

t' (días): Tiempo transcurrido desde la aplicación de la carga.

E_{dg} : Compresión total debida a la degradación del desecho. ($E_{dg}=0.1585$)

d : Tasa de compresión secundaria biológica. ($d=1.14 \times 10^{-3}$)

t'' (días): Tiempo transcurrido desde que se desechó la basura.

[Ref. 21]

Comparación entre los modelos de asentamiento

Cuadro 2. MODELOS: ASENTAMIENTOS QUE EVALÚAN Y APLICABILIDAD EN BOTADERO A CIELO ABIERTO.			
MODELO	ASENTAMIENTO		Botadero a cielo abierto
	Primario	Secundario	
Sowers (1973)	√	√	√
Bjarngard y Edgers (1990)	√	√	√
Hossain y Gabr (2005)		√	
Gibson y Lo (1961)	√	√	
Yen y Scalon (1975)		√	
Edil et al. (1990)	√	√	√
Ling et al. (1998)	√	√	√
Coumoulos y Koryalos (1997)		√	
Park y Lee (1997)		√	
Httiarachchi (2009)	√	√	
Marques (2001)	√	√	

Adaptado de Nur (2010). [Ref. 16].

Caracterización del Material

Tal y como el Decimosexto Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible lo indica, "son muy pocos los estudios de composición de Residuos Sólidos que se han elaborado en el país, y que cuenten con suficiente solidez estadística de la toma de muestra y análisis de resultados, entre los que se pueden citar el estudio de composición realizado por la Municipalidad de San José y la Municipalidad de Esparza" [Ref 6]

A pesar de que no se cuenta con estudios de composición confiables, hay alguna información, bastante alarmante que requiere de atención.

¿Cuáles son los datos?

El último diagnóstico realizado fue en el 2007. [Ref 6] De ahí se sabe que:

- De 1990 al 2006 la generación de desecho se triplicó.
- Únicamente el 55% de los residuos sólidos van a tratarse en un RS.
- Hasta el año 2008 no había una definición explícita del ente responsable de los RS.
- Sólo hay un RS en funcionamiento fuera de la GAM.
- Es muy frecuente la quema de residuos y los botaderos ilegales.
- Hay 13 vertederos semicontrolados.
- Hay 19 botaderos a cielo abierto.

Si se hace una referencia estricta entre qué es un vertedero *semicontrolado* y *a cielo abierto* según la definición dada por el Reglamento sobre Rellenos Sanitarios [Ref 1], la diferencia es mínima. Ambos términos hablan de sitios "sin preparación, con técnicas nulas o muy rudimentarias y sin el control adecuado."

La disposición final de los desechos según el tamaño del cantón (según su población) se da como sigue:

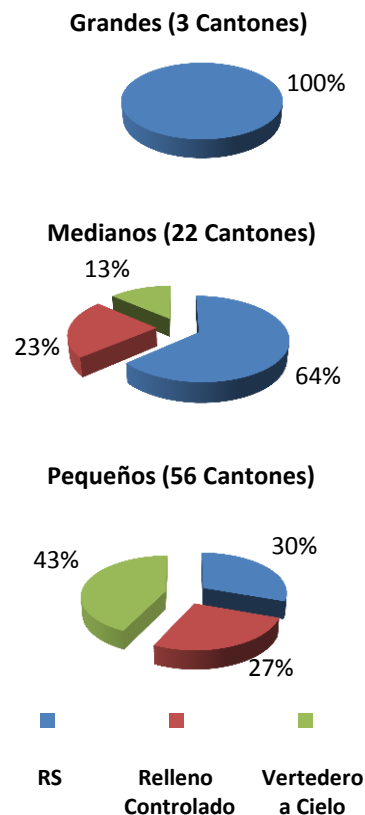


Gráfico 3. Distribución de residuos sólidos según tamaño del cantón. Tomado de PRESOL. [Ref 8]

Del gráfico 2 se observa que el nivel de control en el manejo de desechos sólidos disminuye conforme se reduce la población del cada municipio. Se clasifican como grandes aquellos municipios con más de 200 000 personas, pequeños con menos de 50 000 y medianos en ese rango.

Queda evidente que sólo 3 cantones de los 81 del país llevan el 100% de sus residuos a un RS. Con las información anterior es claro que cualquier sitio de disposición final distinto de un RS es un sitio de potencial peligro para las

comunidades aledañas. Además, es una realidad que los municipios más pequeños, con menores recursos o capacidad de acción son los mismos que llevan sus residuos a botaderos a cielo abierto.

Según los resultados de la Evaluación Final de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos Municipales en Costa Rica, hecho en el 2002, el uso de los sitios de disposición final se da como sigue:

Sitios de disposición final de residuos sólidos

- RS aceptables
- RS no aceptables
- Rellenos controlados
- Vertedero a cielo abierto

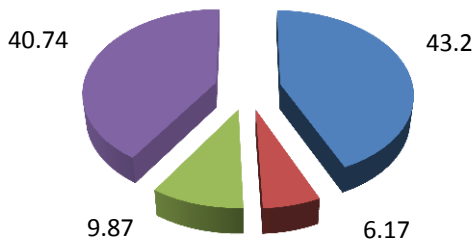


Gráfico 4. Sitios de disposición final de residuos sólidos. Tomado de PRESOL [Ref 8]

En el gráfico 3 se evidencia que, ni la mitad de la basura producida en el país va a un RS aceptable. Más grave aún, ni los RS controlados ni los vertederos son permitidos según la ley, por lo tanto, hay un 57% del total de residuos cuya disposición final es legalmente inaceptada. Esto es lo correspondiente al aporte de 46 municipios.

Los "relleno aceptables" son los únicos que cumplen con la ley vigente. El resto del desecho generado, alrededor de un 59%, está siendo colocado en puntos de potencial riesgo para la población en general.

El siguiente es el análisis comparativo de desechos sólidos municipales de San José. Es la información más reciente con la que se cuenta, a pesar de que los datos son de 1994 y del 2002, únicamente.

Composición del desecho en 1994

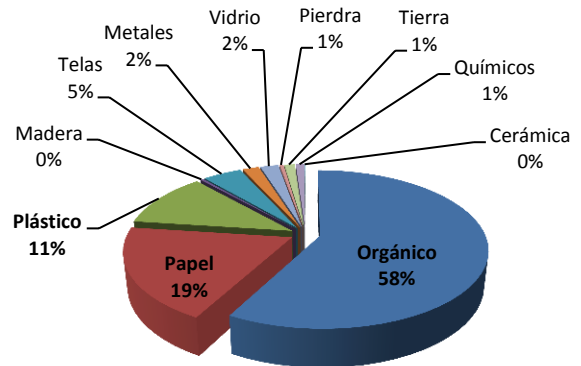


Gráfico 5. Composición del desecho en San José. Estudio de 1994. Tomado de PRESOL [Ref 8]

Estudio del año 2002

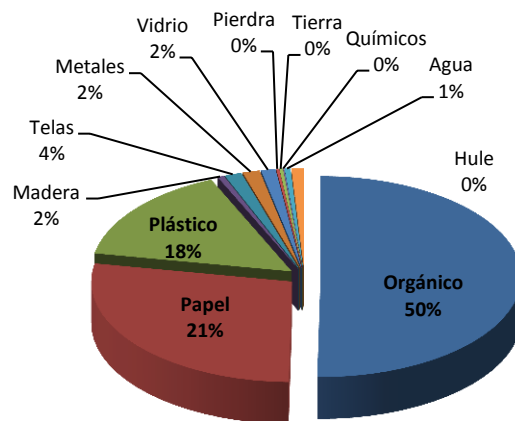


Gráfico 6. Composición del desecho en San José. Estudio de 2002. Tomado de PRESOL [Ref 8].

A partir del gráfico 3 y 4 se ve que los residuos nuestros son mayoritariamente orgánicos. El siguiente componente en mayor cantidad es el papel, seguido por el plástico. Se evidencia además una tendencia a bajar el contenido orgánico, pues del año 1994 que había un 58% pasa a un 50% en el 2002. Más adelante se verá que el contenido orgánico del desecho es de vital importancia cuando se evalúan los asentamientos en un RS.

El Plan de Residuos Sólidos PRESOL indica que "aunque no existen datos confiables se estima que en la zona rural la materia orgánica aumenta en porcentaje y disminuyen materiales

como plásticos, papel y otros residuos inorgánicos normalmente procedentes del embalaje de productos" [Ref. 8]

Respecto a la cantidad de residuos sólidos generados se tiene la tabla con información del 2006, que se presenta a continuación:

problema y la realidad del país, se explicará el mecanismo de asentamientos en los RS y cómo el conocimiento de estos está directamente relacionado con una de las tantas medidas necesarias para el manejo adecuado de desechos.

Cuadro 3. GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES PER CÁPITA Y ABSOLUTA EN EL AÑO 2006			
Municipalidad	Residuos sólidos (kg/hab*día) 2006	Total Población (nº hab) 2006	Generación Absoluta (ton/día)
Grande (>200 mil habitantes)	1.125	836.820	941
Mediana (entre 50 mil y 200 mil habitantes)	0.807	2 017 877	1 628
Pequeña (<50 mil habitantes)	0.785	1 547 303	1 215
Sumatoria	Promedio según número de habitantes: 0.860	4 402 000	3 784

Extraído de PRESOL [Ref 8]

Para el año 2006 se generaban 3 784 toneladas de desecho por día. Como es de esperar, el número aumenta año con año.

Actualmente se están dando avances en el tema de manejo de residuos, las autoridades costarricenses están en la lucha de organizar, controlar y resolver de la mejor manera la disposición de desechos. PRESOL y CYMA (siglas para el programa Competitividad y Medio Ambiente) son evidencia de la reciente acción sobre el tema. Sin embargo, la problemática es muy seria y requiere mucho más esfuerzo tanto de parte de las autoridades como de los individuos. Una vez evidenciada la gravedad del

Resultados: Pruebas Realizadas

Las muestras se obtuvieron del Relleno Sanitario los Mangos, ubicado en la Garita de Alajuela. El siguiente es un levantamiento topográfico del lugar en Marzo del 2012.

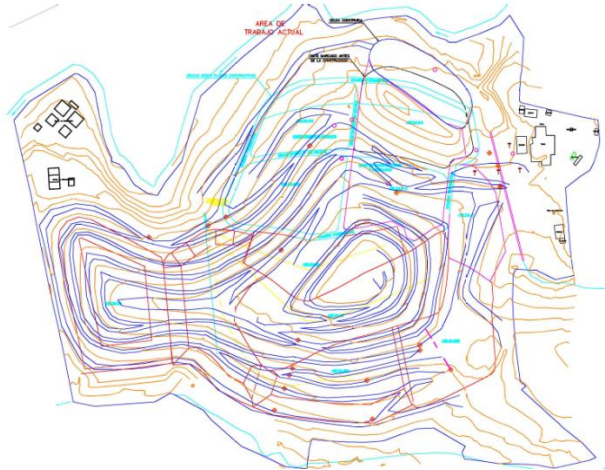


Figura 5. Relleno Sanitario los Mangos, de donde se recolectaron las muestras. Curvas de Marzo del 2012. Aportado por WPP Continental. [Ref. 22]

Pruebas en los desechos

1. Contenido de Humedad

El gráfico 7 comprende los resultados de las pruebas de contenido de humedad realizados, mostrando mayor humedad la muestra de 15 años con bolsa, y menor la de 2 años de antigüedad.

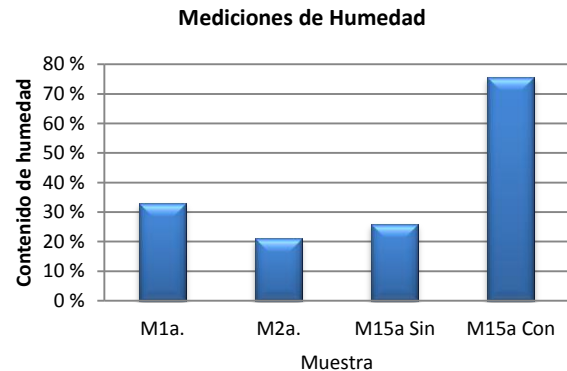


Gráfico 7. Contenido de humedad. Creación propia.

2. Sólidos Totales

El gráfico 8 corresponde a la prueba de sólidos totales, obtenidos mediante horneado de la muestra. El mayor contenido de sólidos corresponde a la muestra de 2 años de antigüedad, con casi un 80% del material sólido.



Gráfico 8. Sólidos Totales. Creación propia.

Sólidos Volátiles y Sólidos Fijos

El gráfico 9 es de sólidos volátiles y sólidos fijos. En la muestra de 15 años con la bolsa más de un 90% del material es volátil, mientras que en la

muestra de 15 años sin la bolsa más de un 60% de este es fijo.

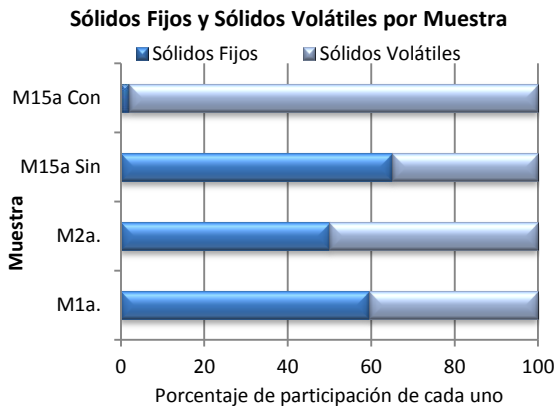


Gráfico 9. Sólidos Volátiles y Sólidos Fijos. Creación propia.

3. Medición de Ph

En el gráfico 10 se presenta los valores de Ph de las muestras. Nótese la zona básica y la neutra, y como todas las muestras son básicas o con tendencia neutra, como la muestra de 1 año de antigüedad.

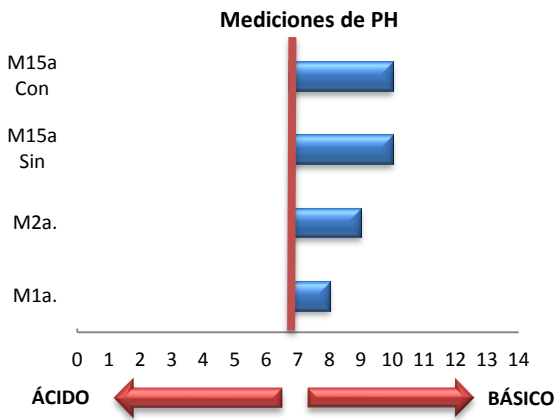


Gráfico 10. Medición de Ph. Creación propia.

4. DBO

Se presenta el gráfico 11 con los valores de DBO de las muestras. La demanda bioquímica de oxígeno presenta dos picos. A los 2 años con un valor de casi 60mg/l y a los 15 años de la muestra con bolsa que supera los 80 mg/l.

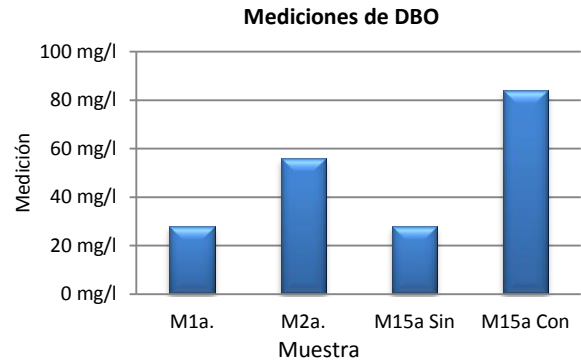


Gráfico 11. Medición de DBO. Creación propia.

5. DQO

En el gráfico 12 se evidencian los resultados de la demanda bioquímica de oxígeno. Tiene tendencia creciente con el tiempo, hasta alcanzar un valor máximo de 500 mg/l en el caso de los 15 años con bolsa.

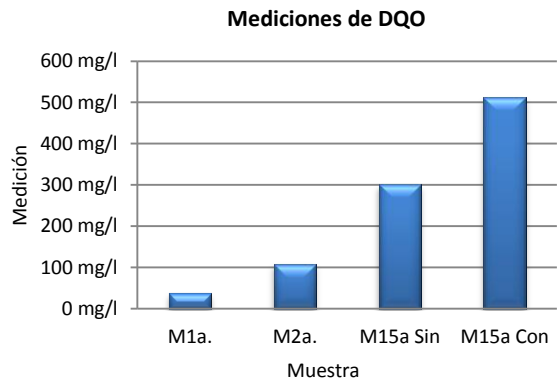


Gráfico 12. Mediciones de DQO. Creación propia.

6. Concentración de Cadmio

En el caso de la presencia de Cadmio se evidencian la usencia de este elemento en las muestras con 15 años de antigüedad, y la mayor presencia en la muestra más joven del grupo.

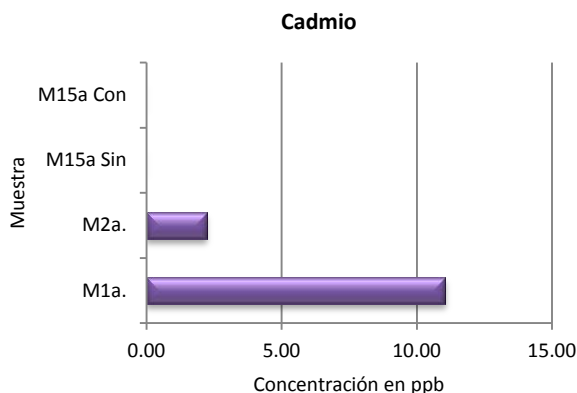


Gráfico 13. Mediciones de Cadmio. Creación propia.

7. Concentración de Plomo

Para el caso de la concentración de plomo en las muestras, se demuestra en el gráfico 14, donde el contenido de plomo es de unas 45ppb en la bolsa de 15 años con la bolsa de 10ppb en la bolsa con un año de antigüedad.

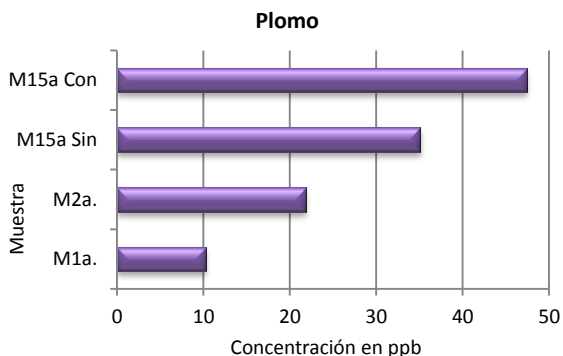


Gráfico 14. Mediciones de Plomo. Creación propia.

8. Concentración de Cobre

La concentración de cobre era cero o estaba por debajo del rango de medición del aparato para todas las muestras.

9. Concentración de Hierro

El hierro por su parte se reporta en el gráfico 15, con ausencia del mismo en la muestra de 15 años con bolsa, y sienta máximo en la muestra de dos años.

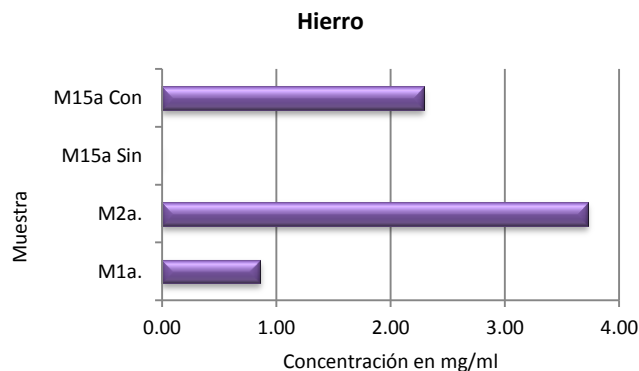


Gráfico 15. Mediciones de Hierro. Creación propia

10. Relación DBO/DQO

La relación entre la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno se presenta en el cuadro 4. Los rangos varían entre 0.09 y 0.72.

MUESTRA	DBO/DQO
M1a.	0.72
M2a.	0.51
M15a Sin	0.09
M15a Con	0.16

Creación propia.

Pruebas en suelos

1. Contenido de humedad

El contenido de humedad del suelo resulta tal como lo muestra el cuadro 5, con humedades entre el 14% y el 27%.

MUESTRA	% W
M1a.	27.13
M2a.	21.88
M15a.	14.57

Creación propia.

2. Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico es el expuesto en el gráfico 16. Las tres muestras tienen graduaciones semejantes.

Porcentaje Pasando (%)

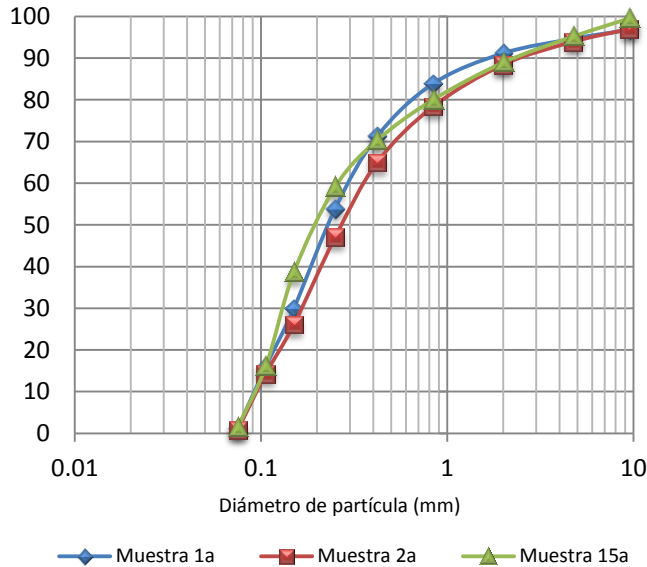


Gráfico 16. Granulometría. Creación propia

3. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son presentados en el cuadro 6. Los índices de plasticidad son de 10 en la muestra de 1 y 2 años, mientras que de 15 en la de 15 años.

	Muestra 1a (%w)	Muestra 2a	Muestra 15a
Límite Líquido	37,59	37,12	43,51
Límite Plástico	28,04	27,42	28,49
Índice de Plasticidad	9,55	9,70	15,02

Creación propia

4. Gravedad Específica

El cuadro 7 presenta las gravedades específicas que varían de los 2.59 a los 2.76.

MUESTRA	Gs
M1a.	2.65
M2a.	2.76
M15a.	2.59

Creación propia

5. Clasificación SUCS

De acuerdo con el sistema de clasificación SUCS propuesto por Casagrande en 1942 las tres muestras son de suelos finos de baja compresibilidad ($LL < 50$) y de acuerdo a la carta de plasticidad se clasifican como suelos Tipo CL-ML.

Datos de sitio: Asentamientos

Se presenta aquí los datos de campo. Primero, como se veía el relleno en Marzo de este año, en la celda de trabajo:

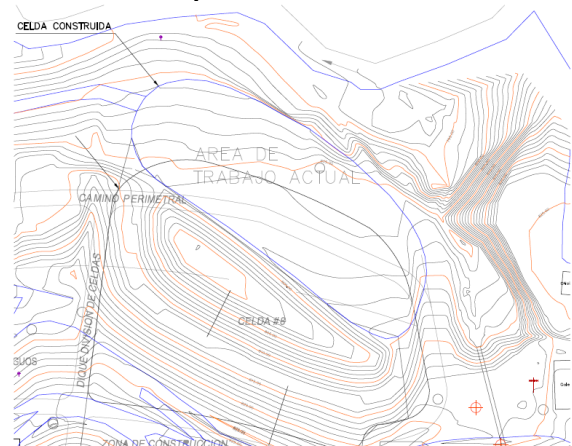


Figura 6. Relleno Sanitario los Mangos, celda de trabajo, Curvas de Marzo del 2012. Tomado de WPP Continental. [Ref. 22]

Segundo, como se ve la misma celda 4 meses después.

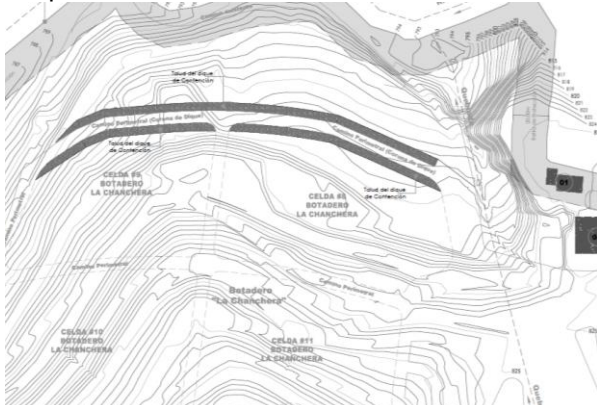


Figura 7. Relleno Sanitario los Mangos, celda de trabajo, Curvas de Julio del 2012. Tomado de WPP Continental. [Ref. 22]

Las curvas de la figura 5 y 6 representan el cambio por llenado en un periodo de 3 meses.

Análisis de los resultados

Selección del modelo de asentamiento:

El mejor modelo de asentamiento es aquel capaz de hacer una representación más exacta de la realidad de los rellenos costarricenses. Se escoge el modelo clásico de Sowers (1973) [Ref. 21] por ser el más adaptable. Una vez que se alimenta con datos de campo, el modelo de Sowers puede ser de los más exactos. A pesar de tratarse de una ecuación relativamente sencilla, considera consolidación primaria, consolidación secundaria y es capaz de representar asentamientos inclusive en botaderos. Pauzi (2010) [Ref. 21].

El éxito de éste modelo depende de las constantes a) tasa de compresión primaria y b) índice de compresión secundaria. Precisamente los valores que pueden ser adecuados a cada relleno. Al ser tan poca la información de campo con la que se cuenta en nuestros rellenos, se utilizan las constantes dadas por el autor.

El modelo de Sowers seleccionado como ideal para adecuar a las condiciones del país, es de fundamento geotécnico. Además considera los principales fenómenos de los asentamientos en los RS, presenta valores de asentamiento muy cercanos a los reales, con variaciones menores a 1m, Babu (2010) [Ref. 21]. Sin embargo, este modelo no considera tampoco las condiciones ambientales de degradación, ni las características propias de los rellenos. Bouzza (1999) [Ref. 21] sugiere que las ecuaciones empíricas consistentes con los principios de la mecánica de suelos son una forma razonable de estimar asentamientos en RS, tal como lo hace Sowers en su modelo.

En la actualidad, la empresa WPP Continental calcula asentamientos a partir de la experiencia (no se cuenta con un modelo).

Lastimosamente, WPP no cuenta con los registros para hacer una predicción exacta de asentamientos, sin embargo, se modela aquí una celda considerando los requerimientos mínimos de compactación del Reglamento de Rellenos Sanitarios (0.8 ton/m³), además, se evalúa un espesor de capa de desecho entre los 0,5 y los 0,8m (intentando reflejar condiciones realistas de compactación en campo). La altura total de esta celda es de 74.74 m, se calcula una capa de cobertura final de 2.1m. Además, se usan las constantes recomendadas por el autor. (Ver apéndice con detalles que alimentan el modelo.)

Se presenta el asentamiento total y su tendencia según Sowers para 5 años, es notoria la tendencia de mínimo asentamiento al final del periodo. Nótese que el modelo proyecta que en los primeros mil días se asienta 8m, mientras que los segundos mil días sólo se asienta 1m.

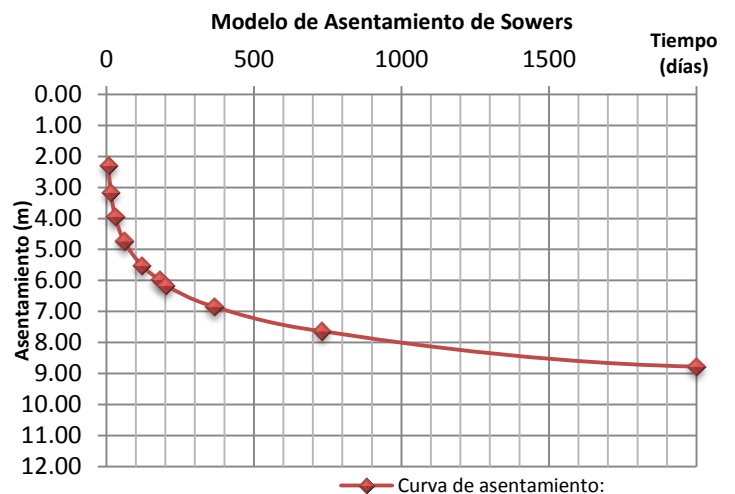


Gráfico 17. Modelo de asentamiento de Sowers (1973). Período de observación: 2 000 días. Creación propia

Con el objetivo de comparar el parámetro de WPP, se analizan los primeros 6 meses de asentamiento. Dicho parámetro indica que un

30% de la altura disminuye en los primeros 6 meses, de los cuales en los dos primeros meses el 25% del asentamiento ya es alcanzado. Se presenta entonces el asentamiento de los primeros 6 meses según Sowers:

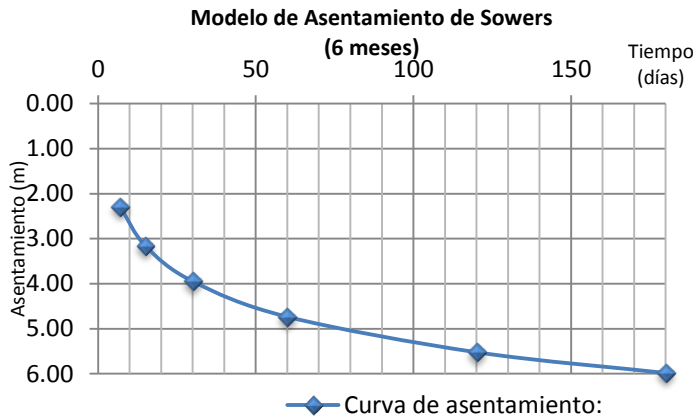


Gráfico 18. Modelo de asentamiento de Sowers (1973). Período de observación: 6 meses. Creación propia

Como se aprecia en el gráfico, el asentamiento total a los 6 meses es de 6m. Recordando la altura de la celda modelada, el 30% corresponde a 22m. Por lo tanto, el modelo de Sowers está representando 3.5 veces menos el asentamiento de referencia dado por WPP.

Posiblemente, el error del modelo de Sowers del 73% de variación con respecto a la medición que usaría WPP pueda explicarse porque que las constantes que rigen el funcionamiento del mismo están dadas para otro tipo de desecho, otras condiciones ambientales, otra geometría y otra logística de operación. Sin embargo, el modelo sí representa un asentamiento razonable, que debe compararse contra mediciones de campo. No contra parámetros fijados dentro de la "zona segura" de operación del relleno.

La ecuación de este modelo permite también hacer una representación por capa. A continuación se dan los asentamientos de las primeras 12 capas contadas desde la superficie (por debajo de la capa de cobertura) y los asentamientos de las últimas 12 capas, desde el fondo de la celda hacia arriba. Las capas se numeran desde la 0 hasta la 111 según el orden de colocación. Siendo la 0 la del fondo y la 111 la más nueva.

Asentamiento en las 12 capas superiores, debajo de la cobertura. Modelo de Sowers

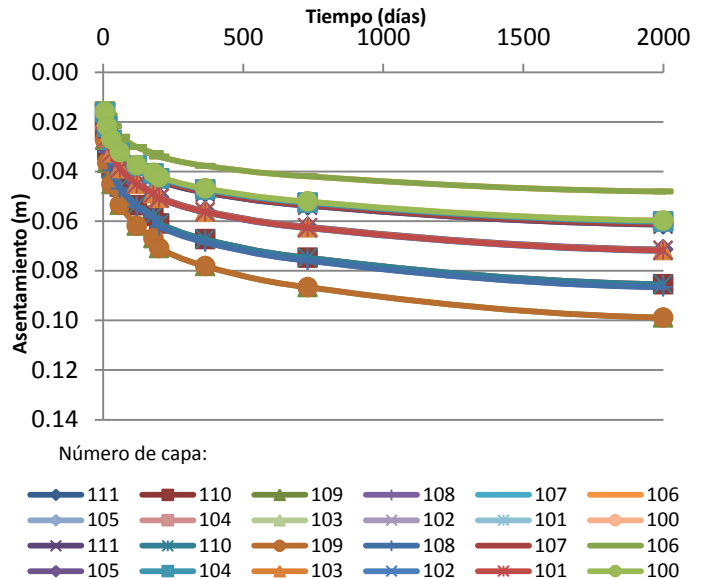


Gráfico 19. Capas de superficie según modelo de Sowers (1973). Período de observación: 5.5 años. Creación propia.

Asentamiento en las 12 capas inferiores, debajo de la cobertura. Modelo de Sowers.

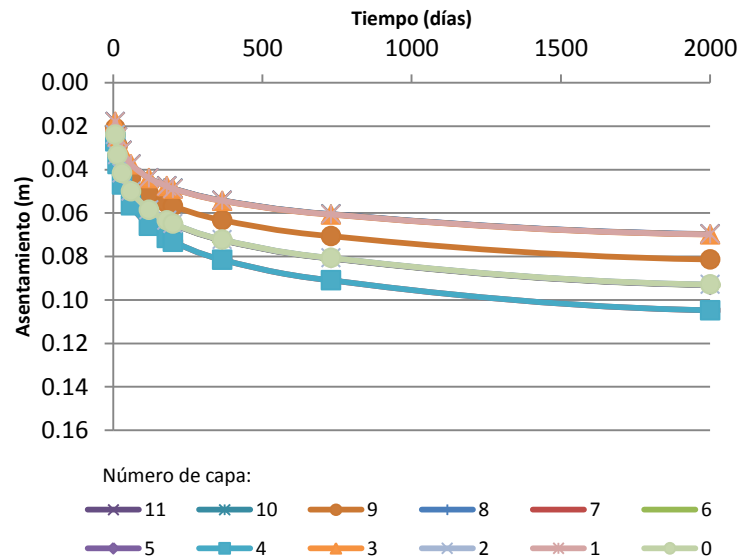


Gráfico 20. Capas de fondo según modelo de Sowers (1973). Período de observación: 5.5 años. Creación propia.

Es evidente que el comportamiento de las capas a profundidad está bien representado por el modelo, en medida que desplaza los asentamientos en grupo hacia abajo, representando mayor asentamiento en las capas de fondo, sin embargo, el modelo matemático no es capaz de reflejar al 100% lo que ocurre en cada capa. Un ejemplo de esto lo da el gráfico 19, donde aparentemente, la capa con menos asentamiento es la 109, cuando se sabe que la que menos se asentó individualmente fue la que se colocó más arriba.

Según Babu (2009), Bouzza (2000), Villarraga (2003), Kavazanjian (2001), Pauzi (2010), Espinace (2010), y otros autores, [Ref. 21] la precisión de un modelo de asentamiento depende mayoritariamente de los datos de campo con que se calibre. Además, estos modelos describen desecho de países industrializados, con bajo contenido orgánico, por lo que su uso requiere la adaptación y verificación en campo. Villarraga (2003). [Ref. 14]

El modelo de Sowers, al igual que el modelo de Bjarngard y Edgers no considera la biodegradación por aparte. De ahí la relativa simpleza de las ecuaciones.

Se analiza también un relleno con las mismas características pero esta vez según el modelo de Bjarngard y Edgers (1990). [Ref. 21] Este modelo tiene la particularidad de ser incoherente para los primeros 90 días de asentamiento. Por lo tanto, la comparación entre modelos será a partir del día 90. Esto es, a los 3 meses:

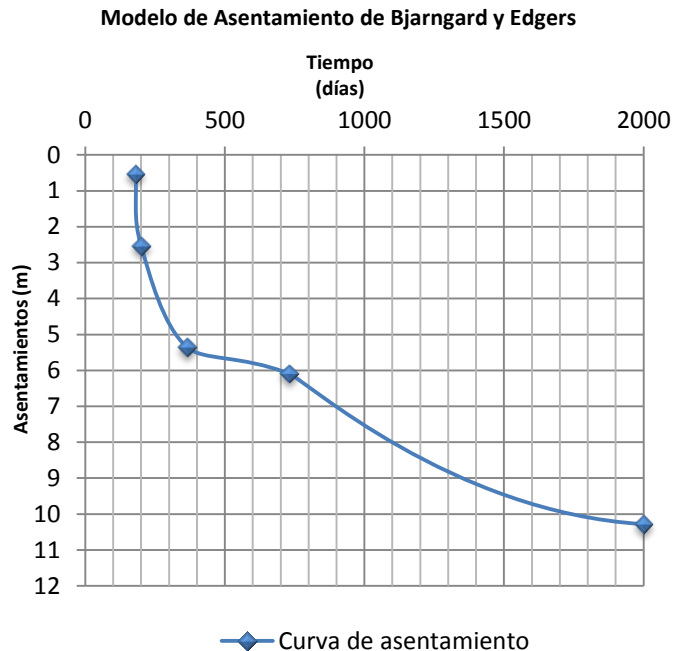


Gráfico 21. Asentamiento según Modelo de Bjarngard y Edgers. Periodo de observación: 5.5 años, pero desde el tercer mes. Creación propia.

Continuando con el modelo de Bjarngard y Edgers (1990) y a manera comparativa, se representan en los dos gráficos siguientes las últimas 12 capas colocadas desde la capa de cobertura, y las primeras 12 capas colocadas desde el fondo de la celda.

Asentamiento en las 12 capas superiores, debajo de la cobertura. Modelo de Bjarngard y Edgers

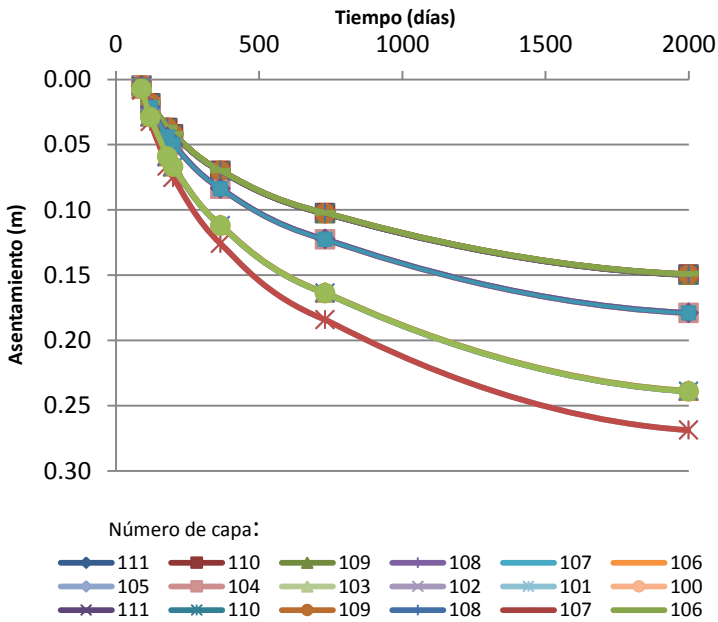


Gráfico 22. Asentamiento en capas superiores. Modelo de Bjarngard y Edgers. Periodo de observación: 5.5 años, Creación propia.

Asentamiento en las 12 capas inferiores, debajo de la cobertura. Modelo de Bjarngard y Edgers

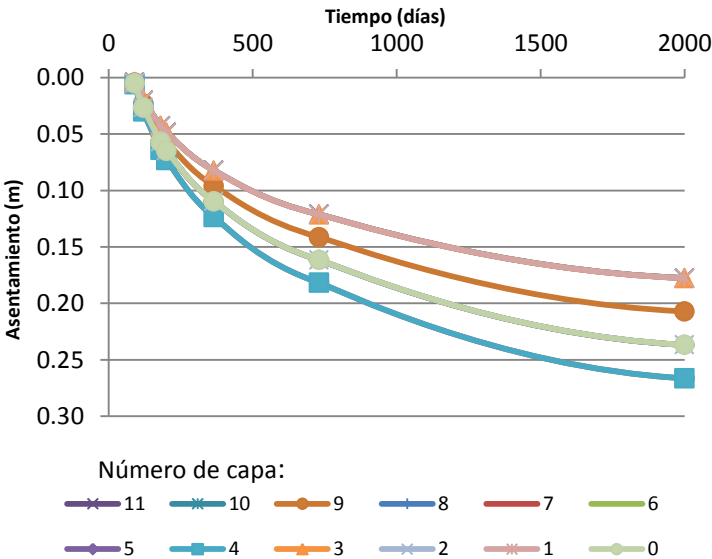


Gráfico 23. Asentamiento en capas inferiores. Modelo de Bjarngard y Edgers. Periodo de observación: 5.5 años, Creación propia.

Considerando tanto el modelo de Sowers como el de Bjarngard y Edgers se nota una incongruencia en el comportamiento de las capas, pues la matemática indica que una capa inferior puede experimentar el mismo asentamiento que otra a distinta profundidad, lo cual, considerando la presión de sobrecarga es imposible. Desde éste punto de vista ninguno de los modelos es veraz. Sin embargo, para efectos generales ambos modelos son capaces de determinar asentamientos en un tiempo dado, con la salvedad de que el modelo de Bjarngard y Edgers aplica después de los primeros tres meses de asentamientos (asentamiento secundario).

Comparando ambos modelos entre sí a largo plazo, se tiene que el modelo de Bjarngard y Edgers da asentamientos más altos que los de Sowers, por una variación equivalente a 1.5 m al cabo de 5.5 años.

El modelo de Hossain y Gabr tiene la peculiaridad de ignorar la compresión mecánica, pero toma en cuenta la biodegradación con su propio coeficiente. Tampoco considera el peso propio de la matriz suelo-desecho.

El modelo de Gibson y Lo, no es ampliamente usado, y en las pruebas hechas por Babu (2010) [Ref. 21] no arrojó datos confiables con respecto al resto de modelos probados. El modelo de la función hiperbólica dio el menor de los asentamientos del grupo en estudio, por lo tanto no se considera confiable. Una participación semejante tuvo el modelo de la función logarítmica, o el de la ecuación de atenuación.

Los modelos que consideran la biodegradación como un fenómeno aparte, son mucho más complejos, y toman en consideración de una u otra forma la participación de gases y líquido producto de la descomposición. Esto los elimina toda posibilidad de uso, pues ocupa de constantes y valores que no se consiguen en nuestros rellenos. Sin embargo, en términos de cobertura, son los modelos que más ampliamente abarcan los asentamientos de los residuos.

En el modelo de Hettiarachchi se considera el efecto de la compresión inmediata y de la biodegradación. Sin embargo, el modelo ignora la generación de lixiviado y sólo considera el efecto del gas. Además, considera una fuente infinita de nutrientes para las bacterias e ignora las condiciones ambientales.

El modelo de Park y Lee no considera la compresión primaria. Sólo considera la compresión secundaria y la biodegradación.

Los modelos de asentamientos en RS pueden ignorar la compresión mecánica ya que ocurre durante o inmediatamente después de que el residuo es colocado, y a largo plazo no tiene mucha importancia en los asentamientos Babu (2010) [Ref. 21]. Pero factores como la compresión dependiente del tiempo, el flujo plástico, la degradación y el peso propio del desecho son factores críticos.

Dentro de los elementos a considerar cuando se habla de los asentamientos en los RS, es la presencia de gas. Aunque en un relleno seco es mucho menor la cantidad, el gas ocupa los vacíos entre partículas y se va acumulando en ellas aumentando la presión. Hettiarachchi (2009) [Ref. 21]. Esta presión se disipa con el tiempo, y el cambio de volumen correspondiente colabora generar los vacíos que provocarán asentamientos.

Las condiciones ambientales juegan un papel muy importante en los asentamientos de un RS. El factor precipitación mejora el medio para los microorganismos existentes, mejorando la biodegradación, provocando mayores asentamientos. Sin embargo, debe aclararse que la lluvia, especialmente en países tropicales, compromete seriamente la estabilidad del RS, y satura los drenajes y demás estructuras de recolección de lixiviados. Por lo tanto, el contenido de humedad es un tema sensible. Uno de las principales preocupaciones en campo de la WPP en el RS Los Mangos, es minimizar el agua que entra al relleno producto de la lluvia. El problema está en que un RS se compacta para densificar, y el agua puede durar tanto en salir que comienza a acumularse, generando afloramientos de lixiviados en la cara del talud. Estos afloramientos, eventualmente crean superficies de falla.

Un relleno saturado es una potencial catástrofe. Pues si se da el "efecto bañera", se acumulan todos los líquidos en el RS, llenándose desde el fondo hasta que sea tan pesado, que alguna estructura de soporte colapse, provocando un irremediable impacto ambiental.

El otro factor ambiental, la temperatura es de vital importancia en países con grandes variaciones en la misma. Para Costa Rica, gracias a que la temperatura es relativamente

constante, la biodegradación no se ve grandemente afectada por ella.

La recirculación de lixiviados, por su parte, puede generar, en condiciones controladas asentamientos mucho mayores. El principio de funcionamiento es simple. Es un sistema de biodegradación continuo.

Los asentamientos en un RS también se ven afectados por la altura del relleno. Como es de esperar, entre más alto sea el relleno, mayor peso actuando en el fondo para asentar. Se entiende entonces como efecto colateral que el relleno será más denso en el fondo.

Además el tipo de residuo que el relleno esté almacenando es determinante de los asentamientos, sobretodo su contenido de orgánicos. El desecho, entre mayor contenido de orgánicos más asentable es, pues la biodegradación se asegura con un alto contenido de orgánicos (recordando que la biodegradación es el factor que más asienta).

El nivel de pH es importante en medida que mide que tan apto es el medio para la actividad bacteriológica. A pesar de que los valores neutrales de pH son los más cómodos para los microorganismos, siempre que no se esté en el extremo ácido o básico las bacterias pueden adaptarse. Los microorganismos son los responsables de la degradación biológica del relleno.

La compactación del desecho es otro factor que influye en los asentamientos. Entre más se compacte, menos vacíos quedan para el reacomodo de partículas o alojamiento de productos de descomposición a través del tiempo. Sin embargo, muchos investigadores dejan de lado la compactación primaria cuando hacen un modelo de asentamiento. La principal razón es que la compactación inicial rápidamente deja de tener efecto en el proceso de asentamiento.

Pruebas en desecho:

Las primeras tres muestras recolectadas (1 año de edad, 2 años de edad y 15 años de edad sin bolsa) son desecho suelto. Sin embargo, y como se dijo en la metodología la cuarta muestra, que tiene 15 años de edad está dentro de una bolsa plástica. Por lo tanto, se analizan en grupo las

primeras tres, y se comparan con la situación de la cuarta muestra.

Las pruebas de contenido de humedad y sólidos totales son complementarias, pues después del horneado, los sólidos que permanecen reciben este nombre. El contenido de humedad no corresponde a agua únicamente. Se trata de todas las sustancias que se volatilizan alrededor de los 105°C.

La muestra con un año de edad es la más húmeda de las primeras tres muestras, como es lógico al ser de las más jóvenes y más cercanas a la superficie del relleno. Sin embargo, la muestra con dos años de edad es más seca que la muestra con 15 años. Esto puede explicarse según la geometría de llenado del relleno. Pues aunque una capa de desecho sea muy vieja, hay partes de ella muy cercanas a la superficie. Estas partes son las partes extremas de la capa, donde no está el sello de varios metros tierra/ basura por encima. Otra explicación es que esa muestra de 15 años se localizara en: a) una flujo interno de lixiviado o b) en una ruta de percolación pluvial por mala compactación de las capas superiores.

El contenido de humedad puede variar mucho de un RS a otro. Según Liu (2006) [Ref. 11] para un RS seco el rango común es de un 25% a un 60%. Por lo que sólo la muestra de 2 años de edad no cumple con dicho rango.

La muestra de 15 años de edad dentro de la bolsa es la mayor de las humedades. Queda claro con este resultado que una bolsa plástica es capaz de crear una cámara en sí misma. Aquí la humedad entró pero nunca logró salir. Se registró una humedad del 75.8%. Esta muestra comprendió papel periódico, entre otros, que estaba mojado y caliente, curiosamente, 100% legible.

Cuando se evalúan los sólidos totales, se incluyen tanto partículas suspendidas como solubilizadas. Se encuentra un mayor contenido de sólidos en la muestra de dos años de edad. Corresponde a un 67% del peso de la muestra. Sin embargo, el contenido de sólidos totales en las tres muestras sueltas es relativamente semejante (67%, 79% y 74%). Estos datos representan el porcentaje de desecho en el RS que ha perdido humedad y por consolidación entra a soportar el peso de las capas superiores, incluye además las partículas finas que viajan por los vacíos y se van acumulando en ellos, dando

como resultado la densificación del relleno a través del tiempo.

La muestra de dos años de edad tiene mayor porcentaje de sólidos. Esto puede deberse a una mayor compactación en ese punto en específico, o a que por variabilidad aleatoria esta muestra se compusiera de un desecho más denso. Sin embargo cuando se trabajó en el laboratorio, no se observó ninguna evidencia de una densidad diferente.

La muestra con menor cantidad de sólidos de las cuatro es la de 15 años con bolsa, como era de esperar ya que acumuló agua y fue esta misma la que salió al realizarse la prueba.

Para la evaluación de los sólidos fijos y los sólidos volátiles se debe tener presente que los sólidos fijos son aquellos que se consideran no orgánicos, y los sólidos volátiles son orgánicos. De las tres muestras sueltas, tiene el mayor contenido de orgánicos la muestra de dos años. Mientras que al año no hay tanto (40%) y a los quince años hay menos (35%). El hecho de que a los 2 años se dé el máximo puede referirse al momento en que la descomposición sea mayor, pues hay mayor generación de material orgánico.

La muestra de 15 años con la bolsa continúa con un comportamiento consistente de mucho volátil y poca masa. Tal y como se evidenció en las pruebas anteriores.

Las mediciones de pH evidencian muestras básicas. Aumentando el pH según aumenta la edad del desecho. De acuerdo con mediciones experimentales de Hao et al (2008) [Ref. 12] y Zhao (2008) [Ref. 12] el pH del desecho se mantiene en el rango ácido todo el tiempo. Por lo tanto, ninguna de las muestras de desecho en Costa Rica cumple con esa tendencia.

El pH es uno de los factores influyentes en la actividad enzimática de las bacterias. Para cada enzima hay un pH que le permite mayor productividad. Por lo tanto, el crecimiento de bacterias depende del pH. La mayoría de bacterias crecen bien en un rango relativamente pequeño de neutralidad (entre 6 y 8). Típicamente se da la muerte debajo de los 4 y por encima de los 9 ó 9.5 de pH. Sin embargo, existen organismos capaces de vivir en estos ambientes. [Ref 3] La producción del gas metano también se ve afectada por el factor pH, en este caso, al tratarse de un pH más bien básico,

puede haber excesiva producción de éste gas. [Ref 12]

La razón por la que estos pH están tan básicos es porque no son mediciones de lixiviado, sino del desecho diluido en agua destilada. Por lo que puede esperarse encontrar mayor contenido bacteriológico en la fase líquida y no en la sólida.

La demanda bioquímica de oxígeno DBO se refiere a la cantidad de materia susceptible a la oxidación por medios biológicos. Mide la concentración de contaminantes de la muestra, pero específicamente lo biodegradable, lo que consumen las bacterias y hongos (y por lo tanto lo oxidan). Se dice también que mide contaminantes orgánicos. Se espera entonces que el desecho más joven presente valores de DBO que crezcan con el tiempo, alcancen un pico y descendan, representando el periodo de mayor descomposición biológica. Este comportamiento es representado por la muestra a 1 un año (28mg/l) a dos años (56mg/l) y a 15 años(28mg/l). Generalmente, la mayoría de las veces que se mide DBO, esta es casi imperceptible después de los 5 años aproximadamente. [Ref 17] Aquí, no se cumple con esta regla de dedo.

La muestra de 15 años en bolsa, por su parte presenta una gran demanda bioquímica de oxígeno. Generalmente, para 15 años de edad, la demanda bioquímica de oxígeno debe ser muy baja o nula. Como se trata de la muestra de desecho con 15 años de antigüedad dentro de una bolsa plástica, se ha creado una incubadora de descomposición con un comportamiento anormal. Es posible que haya una gran disposición de "alimento" para la biodegradación que no haya sido procesado por las bacterias ya que la acción de la bolsa no permite el ciclo completo de vida de las mismas.

La demanda química de oxígeno DQO representa la cantidad de sustancias susceptibles a ser oxidadas. Además en muestras líquidas es evidencia de contaminantes. Por lo tanto, la muestra más susceptible a ser oxidada es la de 15 años de edad, esta es también la muestra más contaminada. En general la variación de edades con respecto al nivel de contaminantes coincide, pues entre más contaminada químicamente esté la muestra, más antigüedad tiene. De hecho, el valor de DQO se espera que aumente con el tiempo, pues mayor es la disponibilidad de material para descomposición química.

El caso de la muestra con 15 años dentro de la bolsa se trata de una cámara que además de mantener un alto contenido de humedad, tiene un alto contenido de contaminantes. Corresponde a un microambiente de descomposición individual.

En el primer año de mediciones de DQO realizada por Hao (2008) [Ref 12], se da un comportamiento creciente a partir del día cero de medición y alrededor del día 100 empieza a decrecer, hasta que mantiene valores constantes. Las muestras recolectadas no coinciden con mantener un comportamiento constante después del año de edad.

Respecto a la concentración de Cd, las muestras más viejas, independientemente de si están o no dentro de la bolsa, están libres de éste elemento. La de un año sin embargo posee 11 ppb, y la de dos 2ppb. Una ppb es equivalente a un μg por cada kg. De acuerdo con las concentraciones de Cd en los suelos alrededor del mundo señaladas por Solange (2010) [Ref14], el rango varía entre 0.07 y 1.1 mg/kg. Por lo tanto, las concentraciones de las muestras no sobrepasan ni siquiera el valor mínimo.

De acuerdo con la toxicidad del efecto final, la simple inhalación de Cd tiene como efecto potencial carcinogénico el cáncer de pulmón (probado en animales). Y como efecto potencial no carcinogénico, daño de riñón, osteoporosis y anemia. Solange (2010). [Ref. 14]

Generalmente la concentración de los metales pesados suele tener mayor capacidad contaminante al inicio y posteriormente, en periodos después de los 15 años aproximadamente, esta capacidad disminuyendo.

La concentración de plomo es notable en todas las muestras, especialmente en la que estaba dentro de la bolsa. Es de los metales con mayor toxicidad. Este elemento tiene como efecto para los humanos tumores en los riñones, bajo peso al nacimiento, anemia, incremento en la presión sanguínea, daños en riñón, afectaciones al proceso de aprendizaje en niños y fuertes daños neurológicos. Su vía de contacto puede ser dérmica, oral o por inhalación. Solange (2010) [Ref. 21] Las principales fuentes de plomo son baterías de este metal, recubrimientos de cables y cañerías antiguas. Martinez (2005). [Ref. 15]

La concentración de cobre es nula en todas las muestras. Esto porque las principales fuentes son los cables eléctricos, circuitos

eléctricos, bobinados de transformadores y semejantes. Martínez (2005) [Ref. 15]

La concentración de hierro encontrada corresponde a un máximo de 3.72 mg/l en la muestra de dos años. Este no es un material tóxico. La mayoría del hierro corresponde a residuos de la industria metal mecánica, desechos de vehículos, maquinaria, repuestos y estructuras de edificios. Martínez (2005) [Ref 15]

Las relación DBO/DQO es un parámetro usado entre otras cosas, para medir la vejez del relleno. Según Henry (1999) [Ref. 18] un RS de los 2 a los 5 años de edad tiene una relación DBO/DQO mayor a 0.7 (no degradados). Más allá de 5 años la relación descende a un rango entre 0.1 a 0.3 (estabilizado).

Al respecto, se encuentran valores consistentes con relaciones de DBO/DQO que disminuyen en el tiempo, sin embargo, la relación DBO/DQO para la muestra de 2a, ya está por debajo del 0,7 representando la tendencia a la "estabilidad" temprana. La muestra de 15 años sin bolsa sí supera el 0,7 (DBO/DQO = 0.09) por lo que se considera bien estabilizada. La muestra de un año con un DBO/DQO de 0,7 representa un material aún sin degradar. Mientras que el caso particular de la muestra de 15 años con bolsa, indica una estabilidad parcial. Dato correspondiente con la gran DBO que se discutió anteriormente.

Pruebas en suelos:

Para la caracterización de los suelos se determinó la humedad natural del suelo. Este suelo da como mayor humedad 27%, mientras que la menor es de 15%. La muestra más seca es también la más vieja de las tres, evidencia de una adecuada conducción de lixiviados en esa zona, pues esta humedad es bastante baja, y estaba a 8 metros de profundidad.

La curva granulométrica da evidencia de un suelo con poca variación del tamaño de partícula. Lo cual es consistente con la clasificación SUCS que se hizo. El tamaño de partícula va de los 0.1mm a los 10mm, las muestras de las tres edades distintas tiene una distribución granulométrica semejante. De partículas que hasta a simple vista se notan finas. El suelo da evidencia de una graduación pobre, lo cual es correcto para el uso que se le da en un

RS. Se espera de las capas de material de cobertura (ya sea diaria o final) tengan características principalmente impermeables, para que evite tanto como sea posible la entrada de lluvia. Además, colocado en capas intermedias durante la construcción del relleno permite la conducción y salida en puntos deseados de lixiviados, disminuyendo el caudal que llega a los drenajes del fondo.

De hecho, la colocación de materiales con características como las aquí evidenciadas puede también hacer sellos de líquido tan eficientes, que si no se manejan con cuidado, traen consecuencias serias al administrador del relleno. Si se revisa precisamente la naturaleza cohesiva del suelo, se puede evaluar la consistencia del material arcilloso.

De acuerdo con los Límites de Atterberg, donde se mide la capacidad de deformación sin ruptura, las muestras denotan un límite líquido de 37 y 43, refiriéndose al contenido de agua en el que el suelo no es ni plástico ni líquido. Se espera que tenga una resistencia a cortante de 2,5kN/m².

El límite plástico por su parte se refiere al contenido de agua con el cual el suelo se manipula según lo establecido y no se desmorona. Aquí los valores andan alrededor de 28. Los valores de los límites de Atterberg son los usados para la clasificación del suelo.

Según SUCS, las tres muestras son de suelos finos de baja compresibilidad (pues su límite líquido es menos a 50) y de acuerdo a la carta de plasticidad se clasifican como suelos Tipo CL-ML. Se trata de una arcilla limosa inorgánica de baja plasticidad.

La reacción de un suelo de relleno con el agua es importante para el control de agrietamientos. Capas de suelo agrietadas permiten la infiltración de precipitación y la salida de gases, ambas situaciones desventajosas para el relleno. El tipo de suelo es el adecuado, pues es impermeable (es una arcilla) y además de baja plasticidad (no tiende a agrietarse tanto al perder humedad).

La gravedad específica evaluada es un factor que depende del contenido de mineral presente en el suelo. Principalmente se usa como insumo de clasificación. En este caso, hay valores oscilantes entre 2,6 y 2,8. Es posible decir que se trata de un grano fino inorgánico, probablemente arcilla-arena fina (limo).

Conclusiones

1. Dentro de los modelos estudiados, ninguno puede simplemente usarse con los datos de los rellenos costarricenses y esperarse resultados exactos de asentamientos. La calibración previa con información de campo es un requerimiento ineludible. Cada modelo es local.
2. Pretender encontrar un modelo capaz de predecir y calcular asentamientos 100% precisos es imposible. Son innumerables los factores que influyen en el comportamiento de la basura, y reproducibilidad en tales circunstancias es muy difícil. Siempre habrá que obviar algunos de estos factores con el fin de describir por medio de un modelo qué ocurre.
3. Darle más valor a la matemática en vez de la practicidad, puede llevar a la inversión de recursos en cosas no factibles, como se ve en modelos de excesiva complejidad que requieren de mucho trabajo para ser aplicados fuera de su lugar de origen. Sin embargo, el modelo de Babu et al (2010) cuenta con un buen equilibrio entre facilidad de alimentación y precisión de mediciones [Ref.22]. Lastimosamente, ocupa de muchísimos parámetros inexistentes en la actualidad.
4. Se tiene que el modelo de Sowers da un asentamiento 1.5m menor que el modelo de Bjarngard y Edgers, en un plazo de 5.5 años.
5. El modelo de Bjarngard y Edgers se indefinía para los primeros 90 días de asentamiento, por lo que no considera la compresión primaria, a diferencia del modelo de Sowers que al día noventa indica 6 metros de asentamiento. Según WPP, al día noventa esta celda tendría 3.5 veces más asentamiento que lo que indica el modelo de Sowers. Osea, tendría 22m menos de elevación.
6. Sólo se podrá saber el verdadero valor mediante placas de asentamiento. Ó podría aproximarse con curvas de nivel cada cierto tiempo.
7. Es altamente probable que los parámetros usados en los modelos revisados no apliquen a un desecho con alto contenido orgánico. La presencia de material orgánico es de las más influyentes, pues es la responsable del mayor asentamiento. De aquí la importancia de clasificar el desecho, pues extrapolar información de un sitio a otro puede dar origen a grandes desfases en el diseño.
8. La guía que las autoridades dan a los rellenos sanitarios del país carece de verdadero fundamento técnico, por lo que no hay criterio para alargar el uso de un relleno o para conocer de antemano que su vida útil será menor, por lo que herramientas como los modelos de asentamientos cobran verdadera importancia en la actualidad.

Recomendaciones

1. Sería recomendable, ahondar la investigación en el modelo de Babu et al (2010), y evaluar su aplicabilidad a los rellenos del país, se perfila como el más indicado hasta ahora.
2. No es posible estudiar el comportamiento de la basura en el país, sin antes conocer cómo es. Por lo tanto, es altamente recomendable hacer un estudio de composición de la basura con adecuadas técnicas estadísticas para garantizar veracidad en el mismo.
3. En Costa Rica, hay bastante problemática respecto al tema de la basura. Ampliar información sobre los bioreactores y los sistemas de gas en los rellenos son posibilidades no tan nuevas que deben explorarse. Más modernas son otras técnicas de eliminación de desechos, como la Pirólisis (incinerado productor de energía). Es recomendable apuntarle a una tecnología con menor impacto ambiental como esta nueva técnica.
4. Se recomienda también la medición de elevaciones periódicas en los rellenos sanitarios y la conservación de estos en orden cronológico, para tener un verdadero estudio de asentamientos a lo largo del tiempo, y así, generar las constantes que luego pudieran darnos un modelo aplicable al país.
5. Es importante validar la metodología que tiene WPP para calcular asentamientos, y así validar el parámetro de la compañía.
6. Muy recomendable se convierte el uso de métodos como los aquí expuestos para la planificación de el manejo de desechos en el país (capacidad máxima del relleno, fecha de clausura del mismo), pues lastimosamente la basura seguirá creciendo y conforme pasen los años, la sociedad evolucione y el tipo de desecho se transforme, la capacidad de cada

celda irá disminuyendo, ya que los asentamientos serán menores.

Apéndices

1. Hoja de trabajo: Modelo de Sowers

2. Hoja de trabajo: Modelo de Bjarngard y Edgers

3. Apuntes de laboratorio: Pruebas Ambientales

4. Apuntes de laboratorio: Pruebas Granulometría

Referencias

1. Arias, O.; Avila, M. 1998. REGLAMENTO SOBRE RELLENOS SANITARIOS. **PODER EJECUTIVO**. Costa Rica. 17p.
2. Piedra, M. et al.. 2007. DIAGNÓSTICO: CIERRE TÉCNICO DEL RELLENO SANITARIO DE RÍO AZUL. INFORME FINAL. **UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**. 193p.
3. LaGrega, M. et al..2001. HAZARDOUS WASTE MANAGEMENT. Segunda Edición. Estados Unidos: Editorial Mc Graw Hill.
4. The Hinkley Center For Solid and Hazardous Waste Management; The Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida; The Civil and Environmental Engineering Department, University of Central Florida. 2008. FLORIDA BIOREACTOR LADFILL DEMOSTRARION PROJECT. EXECUTIVE SUMMARY. 8p.
5. United States Environmental Protection Agency. 2007. BIOREACTOR PERFORMANCE. **UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. 28p.
6. Gómez, S. et al. 2010. DECIMOSEXTO INFORME ESTADO DE LA NACIÓN EN DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE. CAPÍTULO 4: ARMONÍA CON LA NATURALEZA. San José. **Programa Estado de la Nación**.
7. Mora, A. 2011. CUARTO INFORME DEL ESTADO DE LA REGIÓN. CAPÍTULO 9: EL DESAFÍO DEL CAMBIO CLIMÁTICO. San José. **Programa Estado de la Nación**.
8. Programa Competitividad y Medio Ambiente (CYMA), Consorcio AMBERO-IP, Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI). 2007. PRESOL: PLAN DE RESIDUOS SÓLIDOS. DIAGNÓSTICO Y ÁREAS PRIORITARIAS. San José. **Programa Competitividad y Medio Ambiente (CYMA)**.
9. Bowders, J. et al. 2000. SETTLEMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS. **4TH KANSAI INTERNATIONAL GEOTECHNICAL FORUM**. Kyoto, Japan. 6p.
10. Leonard, M. et al. 2005. ESTIMATING METHOD AND USE OF LANDFILL SETTLEMENT. California, USA.
11. Liu, C. 2006. UNSATURATED CONSOLIDATION THEORY OF LONG-TERM MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL SETTLEMENT. **NATIONAL CHI-NAN UNIVERSITY**. TAIWAN. 12p.
12. Hao, Y. et all. 2008. MUNICIPAL SOLID WASTE DECOMPOSITION UNDER OVERSATURATED CONDITION IN COMPARISON WITH LEACHATE RECIRCULATION. **ZHEJIANG UNIVERSITY**. China. 5p.
13. Lee A. et al. 2010. INFLUENCE OF WASTE AGE IN LANDFILL LEACHATE QUALITY. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND DEVELOPEMENT**. Vol 1. No. 4. 4p.
14. Solange. M. 2010. **CONTAMINACION POR METALES PESADOS EN EL BOTADERO DE BASURAS DE MORAVIA EN MEDELLIN: TRANSFERENCIA A FLORA Y FAUNA Y EVALUACION DEL POTENCIAL FITORREMIADOR DE ESPECIES NATIVAS E INTRODUCIDAS**. Tesis de doctorado. Pontificia Universidad Javeriana. Colombia. 164p.
15. Martínez J. 2005. **GUIA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS PELIGROSOS**.

CENTRO COORDINADOR DEL CONVENIO DE BASILEA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. Ficha temática tomo II. Uruguay. 140p.

16. Pauzi, N. 2010. SETTLEMENT MODEL OF WASTE SOIL FOR DUMPING AREA IN MALASYA. **NEJGE**. Vol 15. 13p.
17. Vidal. P. **PRUEBAS DE INGENIERÍA AMBIENTAL**. San Pedro. UCR. Comunicación Personal.
18. Glynn, H. 1999. **INGENIERÍA AMBIENTAL**. Mexico: Editorial Prentice Hall. 800p.
19. Villarraga, M. et al. 2003. CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD EN RELENNOS SANITARIOS. **12° CONFERENCIA PANAMERICNA DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA**. Massachussets, USA.
20. Bouzza, A. et al. 1999. GEOTECHNICAL PROPIETIES OF MUNICIPAL SOLID WASTE AND THEIR IMPLICATIONS ON SLOPE STABILITY ANALYSIS OD WASTE PILES. **XI PANAM**.
21. Babu et al. 2010. PREDICTION OF LONG-TERM MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL SETTLEMENT USING CONSTITUTIVE MODEL. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management**. Vol 14, No. 2, 2010.
22. Triana R. **ENTREVISTAS**. Cartago. Empresa WPP Continental. Comunicaciones personales.