

Geotecnia Ambiental Aplicada para la Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos: El Caso del Botadero San Antonio - Cusco

Applied Environmental Geotechnics for the Characterization of Urban Solid Waste: The Case of the San Antonio Landfill - Cusco

Miguel Angel Vilca Rojas^{1*} , Adan Wilbert Solorzano Montesinos¹  & Michaele Pierina Solorzano Morales² 

¹Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú

²Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

*Autor corresponsal:

Resumen

Miguel Angel Vilca Rojas
miguel.vilca@unsaac.edu.pe

Citar como: Solorzano Montesinos, A. W., Vilca Rojas, M. A., & Solorzano Morales, M. P. (2025). Geotecnia Ambiental Aplicada para la Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos: El Caso del Botadero San Antonio - Cusco. *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*, 8(1), 34-60. <https://doi.org/10.51343/racs.v8i1.1515>

Recibido: 05 de diciembre de 2024

Aceptado: 21 de agosto de 2025

Los residuos sólidos urbanos (RSU) actualmente representan un enfoque de investigación emergente dentro del ámbito de la ingeniería civil, debido al constante incremento en su generación de residuos sólidos urbanos, siendo su disposición final son frecuentemente en botaderos (rellenos artificiales sin control técnico), constituye una preocupación ambiental creciente, donde la geotecnia ambiental desempeña un rol fundamental. El presente estudio, pionero a nivel nacional, tiene como objetivos principales la determinación de los parámetros de caracterización geotécnica y la estimación de asentamientos en el botadero de San Antonio, Cusco. La metodología empleada contempló la realización de diversos ensayos geotécnicos entre ellos, la determinación de densidad, contenido de humedad, granulometría, permeabilidad y medición de temperatura, parámetros que permitieron de base para analizar los asentamientos y procesos de consolidación del botadero, aplicando modelos mecánicos como los propuestos por Sowers y la ley de Fluencia tipo Potencia (Power Creep Law). Los resultados obtenidos indican que el promedio de residuos orgánicos es 11.86% mientras que los residuos inorgánicos representan el 88.14%. Así mismo, se concluye que el modelo de Sowers presenta una mayor precisión respecto al asentamiento medido en campo, mientras que el modelo Power Creep Law tiende a sobreestimar los valores, mostrando desviaciones significativas.

Palabras clave: *Residuos Sólidos; Botadero; Geotecnia Ambiental; Asentamientos; Predicción de Asentamientos.*

Abstract

Urban solid waste is currently a new research focus in civil engineering, in response to the increasing generation of urban solid waste. The final disposal is in landfills (artificial fill), where Environmental Geotechnics plays an active role. This research is the first to be developed at the national level, and its objectives are the characterization of parameters and the estimation of settlement of the urban solid waste landfill (San Antonio Dump, Cusco). The methodology developed was to develop

©Los autores. Este artículo es publicado por la revista *Ambiente, Comportamiento y Sociedad* (RACS) de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional /CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



geotechnical tests, namely: density, humidity, granulometry, permeability, and temperature, which allowed determining the settlements and consolidation phenomena of the landfill, using mechanistic models such as Sowers and Power Creep Law. The results show that the average percentage of organic waste is 11.86 % and the average percentage of inorganic waste is 88.14 %. It is also concluded that the Sowers model has better accuracy than the actual settlement value measured in the field. In contrast, the Power Creep Law prediction model has very extreme values.

Keywords: *Solid Waste; Landfill; Environmental Geotechnics; Settlements; Settlement Prediction.*

Introducción

Las investigaciones en geotecnia ambiental aplicada a residuos sólidos urbanos (RSU) han avanzado a nivel internacional, en este contexto, (Okonta, Tchani-Nankoue, & Karimi, 2024) evaluaron las propiedades geotécnicas in situ y en laboratorio de los residuos de un relleno sanitario del sureste de Johannesburgo. El estudio abordó el desafío de la composición heterogénea de los RSU, el mismo que dificulta la estabilidad de los rellenos.

Acerca de las propiedades geotécnicas de los residuos sólidos urbanos sintéticos, (Singh & Uchimura, 2023) en su estudio buscaron comprender la contribución de cada material, como papel, plástico y material orgánico, al corte, siendo este parámetro fundamental para el diseño de vertederos y garantizar su seguridad y rendimiento. Los resultados obtenidos en este ensayo demostraron que, a medida que aumenta la proporción del papel, la cohesión (C) incrementa y el ángulo de fricción (ϕ) disminuye, cuando aumenta la proporción de plástico la cohesión y el ángulo de fricción disminuyen y cuando se tiene un incremento de material orgánico la cohesión y el ángulo de fricción aumentan. Con estos resultados se demuestra que los materiales conformantes del RSU contribuyen frente al corte, por lo tanto, se debe considerar el efecto de la composición del material al diseñar un vertedero para mejorar la seguridad y estabilidad del mismo.

También, (Eugeniuz, y otros, 2023), analizó las diversas soluciones técnicas aplicadas en la conformación del cuerpo del relleno sanitario y la estabilidad de taludes. Durante la evaluación se advirtió que el vertedero no contaba con sistemas de drenaje que mitiguen el impacto al entorno de suelo – agua. Con los resultados del análisis y el modelado numérico, se propusieron sistemas de drenaje con la finalidad de mejorar la calidad del agua subterránea y las condiciones de estabilidad de la pendiente de los taludes del vertedero. Esta propuesta permitió reducir la propagación de contaminantes (lixiviados), proteger las laderas de la erosión y mejorar el valor paisajístico.

En la tesis de (Fahin & Soheli, 2021), desarrollaron un programa de caracterización geotécnica de un vertedero de RSU clausurado, que se encuentra en Diabara, Uttara, Dacca, Bangladesh. Frente al aumento de la población se ha incrementado la necesidad de espacios para vivienda, siendo la propuesta de este trabajo el uso del área donde se encuentra el vertedero clausurado con fines de vivienda.

Luego de haber realizado los ensayos de laboratorio como; contenido de humedad, análisis de granulométrico, límite líquido, corte directo y proctor estándar. De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio los autores concluyen que el vertedero tiene una capacidad de carga asegurada y puede ser utilizado para fines de desarrollo.

En el trabajo de (Naveen, 2018), desarrolló la medición de las propiedades estáticas y dinámicas de RSU en el vertedero de Mavallipura, India. Se realizaron ensayos exhaustivos en laboratorio siendo estos los siguientes; composición de los RSU, contenido de agua, conductividad hidráulica y comportamiento al corte y los ensayos In Situ fueron el ensayo de carga en placa cíclica y ensayos geofísicos. Los resultados obtenidos de la prueba de carga en placa se compararon con simulaciones numéricas con el PLAXIS 2D. Con los resultados obtenidos servirán de guía para el análisis de la respuesta sísmica del terreno en el vertedero de RSU en el diseño y operación de los vertederos en la India.

Por otro lado, (Feng, Ke-Wei, Chen, Zhang, & Chen, 2017) llevo a cabo una investigación exhaustiva de las propiedades geotécnicas de los RSU en el vertedero más grande de China, incluyendo la composición de los residuos, peso unitario, relación de vacíos, contenido de humedad, la conductividad hidráulica y comportamiento al corte directo, siendo el problema la heterogeneidad de los RSU. La resistencia al corte directo obtenido fue inferior a los valores reportados en otros países, los cuales se atribuyeron a la menor presencia de materiales fibrosos en las muestras analizadas., en conclusión, los resultados aportados por este estudio brindan información clave para el diseño eficiente de los vertederos y su adecuado funcionamiento en China.

En el artículo de (Sandoval-Vallejo, Ramirez-Tascon, & Cuaran, 2015), desarrollaron un programa experimental con la finalidad de obtener los parámetros de resistencia al corte no consolidado no drenado (UU) sobre muestras reconstituidas en laboratorio, del relleno sanitario presidente en el valle del Cauca (Colombia). La variación del ángulo de fricción interna y la cohesión, en función a la evaluación del peso específico, profundidad y tiempo de descomposición del relleno. Los resultados mostraron una marcada influencia del tiempo de descomposición en la resistencia al corte, cierta dependencia con la profundidad, finalmente los parámetros de resistencia al corte obtenidos se encuentran dentro del rango internacional recomendados para el diseño o controlar la operación de otros rellenos sanitarios.

De acuerdo a (Mondelli, Giacheti, & Elis, 2012), los botaderos y rellenos sanitarios son una fuente potencial de contaminación, por esta razón en el presente trabajo de investigación se desarrolló una evaluación in situ y laboratorio del material del terreno donde se encuentra emplazados los botaderos y rellenos sanitarios. Se han desarrollado geofísicos y geotécnicos in situ con la finalidad de proponer un programa de investigación del subsuelo e hidrogeológico, donde se instalará un nuevo relleno sanitario, clausura de un botadero o un botadero controlado.

En relación al trabajo de investigación de (Lemos Machado, Karimpour-Fard, Shariatmadari, Carvalho, & C.F. do Nascimento, 2010), evalúan algunas propiedades y el comportamiento geotécnico de los residuos sólidos urbanos en dos vertederos brasileños. Por otro lado, para estimar los parámetros geotécnicos se analizó el revestimiento de la cobertura, sistema de recolección de lixiviados y biogás, adicionalmente, se tomó en consideración el clima, tecnología de eliminación, cultura y hábitos de la comunidad local. Los autores consideraron que los resultados obtenidos, podrían ser una buena referencia en ciertos aspectos y propiedades geotécnicas de los RSU en países que tengan condiciones similares al ámbito tomado en el presente trabajo.

En el documento de (Reddy, Hettiarachchi, Gangathulasj, & Bogner, 2009), presenta un programa de ensayos de laboratorio para determinar las propiedades geotécnicas de residuos sólidos urbanos frescos durante la fase de explotación del vertedero de Orchard Hills (Illinois). Se desarrollaron pruebas en laboratorio para determinar las propiedades de compactación, conductividad hidráulica, compresibilidad y resistencia al corte con un contenido de humedad gravimétrico del 44%. Los autores concluyen que, se deberá de desarrollar estos ensayos de laboratorio durante la conformación del vertedero, con la finalidad de alcanzar una mejor estabilidad del mismo.

De acuerdo a (Dimitros P., 2005) en su Tesis de Doctoral desarrollo un programa de ensayos de pruebas in situ y de laboratorio principalmente a gran escala, con la finalidad de evaluar las propiedades estáticas y dinámicas de los RSU del vertedero de tres ciudades. En la Universidad de California en Berkeley, para conocer las propiedades estáticas se desarrollaron los ensayos siguientes: propiedades estáticas; peso unitario, esfuerzo cortante, compresibilidad, conductividad hidráulica y caracterización del RSU y para las propiedades dinámicas fueron: Velocidad de onda transversal/Módulo de corte de pequeña deformación, coeficiente de amortiguamiento, Reducción del módulo de corte frente a la deformación por corte y el módulo de corte (G) que se define como la relación entre la tensión cortante (σ_s) y la deformación cortante (γ). El evaluar y estimar estas dos propiedades de los RSU es de vital importancia para garantizar las operaciones de los vertederos de manera segura y eficiente.

De acuerdo al trabajo de (Bernardo, Eugenio, Yamin, & Soler, 2002), desde 1989 el relleno sanitario Doña Juana recibió 5,000 toneladas diarias de RSU de la ciudad de Bogotá, se estuvo probando la recirculación de lixiviados como método de tratamiento, el mismo que causo un deslizamiento masivo de 800,000 toneladas de RSU, siendo esta una de las fallas más graves en la historia de rellenos sanitarios en Colombia. La investigación tuvo por finalidad determinar las causas de este evento, desarrollándose estudios en detalle de la superficie de falla, secuencia de la construcción y los materiales utilizados, conjuntamente se desarrollaron modelos matemáticos. Estableciéndose que la presión de poros fue la causa principal de la inestabilidad del relleno sanitario, esto debido a la presencia de lixiviados en los taludes del relleno sanitario y en el interior de los drenes verticales de gas que dificulto la salida del biogás.

En este contexto, actualmente no existen estudios geotécnicos en la región del Cusco ni el Perú que analicen simultáneamente la composición de los residuos sólidos urbanos (RSU). Por ello, el objetivo de la presente investigación fue caracterizar las propiedades geotécnicas de los RSU del botadero de San Antonio. Este estudio tiene la finalidad de estimar los asentamientos generados en el relleno de residuos sólidos urbanos a través de modelos matemáticos, resultados que son comparados con el monitoreo del asentamiento de 03 unidades de bloques de concreto construidos en el relleno de residuos sólidos urbanos.

La metodología implementada incluyó un monitoreo continuo, que permitirá conocer el comportamiento mecánico del relleno sanitario desde una visión geotécnica, validando el modelo matemático que se más confiable al aproximar sus resultados al asentamiento monitoreado de los bloques de concreto y finalmente los resultados obtenidos permitirán proponer alternativas de reinserción del botadero en base al comportamiento mecánico para otros usos diferentes.

Materiales y Métodos

Se utilizaron los conceptos de la geotecnia clásica con la finalidad de caracterizar geotécnicamente los residuos sólidos urbano como se indica a continuación:

Descripción del Trabajo en Campo

Para llevar a cabo la caracterización geotécnica de residuos sólidos urbanos, se excavaron (04) calicatas con profundidades promedio que oscilaron entre 1.00 m. y 1.50 m. De cada uno de ellos se extrajeron muestras de residuos sólidos con un peso aproximado de 100 kg. Estas muestras fueron depositadas en (04) cilindros de plástico y trasladadas al laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC).

Caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos

Se empleo el método propuesto por (Dimitros P., 2005), iniciando con la utilización de un tamiz de 20 mm (3/4") para separar materiales. A continuación, se realizó una clasificación visual individual de cada uno de los componentes presentes en la muestra. (Landva & Clark, 1990) considera que la clasificación de RSU en función de la biodegradabilidad de cada uno de sus componentes, indicando que el índice de descomposición no es el mismo para cada uno de los materiales.

(Dimitros P., 2005) condujo un programa experimental de caracterización geotécnica de RSU, el mismo que se ha desarrollado en la presente investigación, siendo las partículas del material pasante el tamiz de 20 mm (3/4"), correspondientes a fracciones más pequeñas, fueron pesadas y ensayadas en el laboratorio de Mecánica de Suelos, utilizando el equipo convencional de tamices para análisis granulométrico. El procedimiento se realizó exclusivamente con el material pasante de dicha malla, siguiendo el método granulométrico estándar. Cabe mencionar que, durante la inspección visual, se identificó que una pequeña fracción de este material contenía elementos como plásticos, maderas y papeles de tamaños reducidos.

Peso Unitario de los Residuos Sólidos Urbanos

(Fassett, Leonards, & Reppeto, 1994), da algunas precisiones que deberán de ser considerados antes de proceder a calcular el Peso Unitario de los RSU siendo los más significativos los siguientes: Composición de los RSU considerar la cobertura diaria y contenido de humedad, grado de compactación, edad de los RSU y profundidad de medición del Peso Unitario.

Para la determinación del peso unitario el que mejor aplica a las consideraciones de Fasset J. B. es ejecutar el ensayo in situ, se aplicaron dos normativas la ASTM D5030 – 89 y la USBR 7221 – 89. Ambas incluyen el procedimiento denominado “Determinación del peso unitario de suelos in situ por el método del reemplazo de agua en un ensayo de hoyo”, específicamente el numeral 10 método A, que corresponde al cálculo del peso unitario in situ en proyectos de infraestructura como presas de tierra, terraplenes de carreteras y estructuras de relleno.

Contenido de Humedad de los Residuos Sólidos Urbanos

(Penmethsa Kiram, 2007), define el contenido de humedad de un RSU como la relación del peso de agua entre el peso de los sólidos secos presentes. Después de haberse colocado capas de cobertura de suelo, el contenido de humedad se incrementa a través de la absorción de agua por algunos componentes como son: papel, cartón y telas.

El Contenido de Humedad de las muestras fue determinado conforme a los métodos estándar ASTM D 2974 – 00 y APHA 2540 – B (Kelly, 2002). Se recolectaron cuatro (04) muestras representativas de aproximadamente 5 kg a 6 kg en cada punto, repetidas en cuatro sectores del botadero.

Inicialmente, el material de estas muestras fue sometido a un proceso de secado al aire, ya que contenía componentes volátiles además del agua, como nitrógeno amoniacal, lípidos, entre otros. Posteriormente, las muestras se colocaron en envases abiertos y fueron sometidas a secado en horno a una temperatura de 60 °C, durante aproximadamente dos días, hasta alcanzar pesos consecutivos constantes. De esta manera se determinó el contenido de humedad tanto en base al peso seco como el peso húmedo.

Análisis Granulométrico

Según (Landva & Clark, 1990) el análisis granulométrico de cada uno de los tamaños de los componentes es de gran utilidad para la clasificación o caracterización de los RSU.

La Dra. Teresa Mateos García (Mateos García, 2003), señala que debido a la dificultad que implica la realización de este ensayo con muestras de RSU, una práctica común es separar individualmente sus distintos componentes y medir la variabilidad que presenta.

El análisis de tamizado se realizó sobre el material que pasó por el tamiz de 20 mm (3/4"). Para ello, se empleó una serie de tamices estandarizados: N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 60, N° 100 y N° 200. Las partículas retenidas en cada tamiz fueron recolectadas y pesadas individualmente. El porcentaje pasante a través de cada malla se calculó dividiendo el peso retenido por el peso total de la muestra inicial seca. Los ensayos se ejecutaron con material extraído de 4 sectores del botadero, utilizando cuatro (04) muestras representativas de cada sector. A partir de estos datos, se graficó el promedio de la distribución granulométrica obtenida.

Durante el proceso, se observó la presencia de residuos sólidos visibles en los tamices N° 4, N° 10, N° 20 y N° 40, tales como: vidrios, huesos, restos de plástico, restos de madera y raíces. En los tamices de menor apertura (N° 60, N°100 y N° 200) no se identificaron residuos sólidos visibles.

Permeabilidad de los Residuos Sólidos Urbanos

La Dra. Teresa Mateos García (Mateos García, 2003), indica que el valor de la permeabilidad es importante para poder estimar como va ser el desplazamiento de los líquidos o lixiviados a través del Botadero y poder hacer un adecuado diseño del sellado del mismo.

(Pelkey Shaun, 1997), señala que las características hidráulicas de un RSU son importantes en el diseño de un sistema efectivo de control de lixiviados para un relleno sanitario.

En la presente investigación, se ha desarrollado el ensayo de LeFranc NF EN ISO 22282-2:2014 / ASTM D2434 con nivel variable para estimar el coeficiente de permeabilidad. En este ensayo se evaluaron tres puntos representativos del Botadero, ubicados a un costado de los dados de concreto, de la manera siguiente: se perforó un pozo de profundidad de aproximadamente 60 cm, posteriormente se introdujo un tubo de PVC de 4" de diámetro, el cual se selló con arcilla en el borde de contacto suelo – tubo.

La permeabilidad se ha estimado mediante la expresión siguiente:

$$K = \frac{d_c^2 \ln(2L/d)}{8.L.t} \ln \frac{h_1}{h_2} \dots\dots\dots (\text{Ec. 01})$$

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad.

h1, h2, = Altura del agua al principio y al final del ensayo.

t = Tiempo transcurrido entre la observación de los niveles h1, h2.

L = Longitud de la zona filtrante.

d = Diámetro de la zona filtrante.

de = Diámetro de la entubación (puede ser igual a d).

Capacidad de Soporte del Relleno de Residuos Sólidos Urbanos

Espinace Abarzua, (Espinace Abarzua, Palma G., & Valenzuela T., 2006), desarrollo In Situ ensayos de penetración y ensayos de Carga en Placa, ambos ensayos se realizaron en los Rellenos Sanitarios de Loma Los Colorados y Santa Marta por investigadores del Grupo de Geotecnia de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – Chile.

Los ensayos de penetración estática (CPT) y los ensayos de penetración estándar (SPT) se han empleado también en otras ocasiones para determinar a través de correlaciones, la resistencia y la compresibilidad de los RSU (Hinkle, 1990; Oakley 1990; Jessberger y Kockel 1991). Sin embargo, la aplicación de correlaciones de suelos para estos materiales no puede considerarse viable salvo comprobaciones previas.

Con el fin de determinar los parámetros de resistencia, se llevaron a cabo ensayos en campo que proporcionaron datos más representativos de las condiciones reales del botadero. Entre las experiencias desarrolladas in situ, los procedimientos más conocidos y ampliamente aplicados son los ensayos de Penetración y los Ensayos de carga en placa, conforme a las metodologías establecidas por ASTM (2013).

Ensayo de Penetración Estándar en el Relleno de Residuos Sólidos Urbanos

Este tipo de ensayo de penetración es uno de los más utilizados, ya que permite elaborar distribuciones estratigráficas, mediante evaluaciones cualitativas de la resistencia del relleno de residuos sólidos urbanos del botadero en función de la penetración relativa a distintas profundidades. Dichas evaluaciones permiten identificar zonas relativamente débiles dentro del botadero, así como analizar si la resistencia de los residuos sólidos urbanos presenta variaciones a lo largo del tiempo.

Con el objetivo de obtener parámetros de resistencia, se realizaron ensayos de campo. Con la finalidad de alcanzar datos representativos del relleno en el botadero, se llevaron a cabo cinco (05) sondeos de Ensayos de Penetración Estándar (SPT). Estos ensayos alcanzaron una profundidad máxima de 6.0 m. Las muestras obtenidas con la cuchara muestreadora estaban compuestas principalmente por material de demolición y en algunos casos, únicamente por líquidos lixiviados.

Ensayo de Penetración Dinámica Liviana en el Relleno de Residuos Sólidos Urbanos

Se realizaron ensayos de Penetración Dinámica Liviana (PDL), con el propósito de determinar la resistencia del relleno de residuos sólidos urbanos frente a la penetración, así como estimar los parámetros ϕ y C. Además, este tipo de ensayo permitió evaluar cualitativamente el comportamiento del Botadero, ya que el número de golpes registrados brinda una referencia sobre la naturaleza del material de relleno.

Finalizados los cuatro ensayos (04) de hoyo (Test Pit), se aprovechó la excavación como calicata para efectuar los ensayos de Penetración Dinámica Liviana (PDL), conforme a los lineamientos establecidos en la norma NTP 339.159.

Ensayo de Carga en Placa en el Relleno de Residuos Sólidos Urbanos

En el desarrollo de la presente investigación se ejecutó el ensayo de Placa de Carga siguiendo los lineamientos de las normas son DIN 18134, la UNE 103807-2, la NLT-357/98, y las ASTM D1194, D1195, y D1196. El objetivo fue analizar el comportamiento esfuerzo – deformación del terreno. Adicionalmente otras investigaciones documentan experiencias con placas convencionales de diversos diámetros, así como ensayos de carga de gran escala.

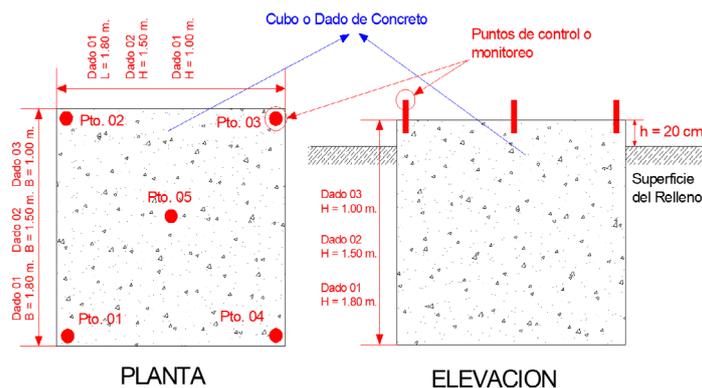
En el marco de la presente investigación se realizó un ensayo de carga en placa, empleando una placa metálica circular de 45 cm de diámetro y un espesor no menor a 1 pulgada. Se utilizaron deformímetros de precisión con una sensibilidad mínima de 0.25 mm. La carga de reacción fue proporcionada por un camión volquete de dos ejes de 15 m³, el cual generó una reacción de aproximadamente 20 Tn (200 kPa).

Monitoreo de la Capacidad de Soporte del Relleno

Para determinar el asentamiento en un intervalo de tiempo definido, se construyeron tres (03) cubos de Concreto en el área de estudio del botadero, los cuales fueron colocados dentro del relleno a distintas profundidades. Sobre la superficie de cada cubo se instalaron cinco estacas de fierro, estableciendo así puntos de control para la medición de asentamiento, tal como se indica en la figura siguiente:

Figura 1

Vista en planta y elevación de la disposición de los dados de concreto para su monitoreo



Nota. Dimensiones de los dados de concreto, los mismos que fueron instalados (03 unidades) sobre el relleno del botadero, los mismo que contaron con dimensiones diferentes.

Los cubos de concreto que fueron monitoreados tuvieron las dimensiones siguientes:

DADO 01; dimensiones: 1,80 m x 1,80 m y una profundidad $h = 1,80$ m, se ha utilizado un concreto de $f'c = 140$ kg/cm².

DADO 02; dimensiones: 1,50 m x 1,50 m y una profundidad $h = 1,50$ m, se ha utilizado un concreto de $f'c = 140$ kg/cm².

DADO 03; dimensiones: 1,00 m x 1,00 m y una profundidad $h = 1,0$ m, se ha utilizado un concreto de $f'c = 140$ kg/cm².

Posteriormente se realizó una recarga en cada uno de los cubos o dados de concreto colocándose sobre cada uno de ellos los pesos siguientes:

Dado 01: se colocó una sobrecarga de 2000 Kg.

Dado 02: se colocó una sobrecarga de 1500 Kg.

Dado 03: se colocó una sobrecarga de 1000 Kg.

Los valores del asentamiento obtenidos con el monitoreo de cada uno de los 03 dados de concreto han permitido realizar un retro cálculo (Back análisis) para obtener los parámetros de compresibilidad propios del botadero de San Antonio.

Modelos Geotécnicos de Predicción de Asentamientos del Relleno de Residuos Sólidos Urbanos

Los residuos sólidos depositados en el relleno del botadero experimentan asentamientos significativos, lo que genera una reducción de volumen e incrementa su resistencia. La cuantificación de estos asentamientos, así como la determinación de su ritmo y momento de aparición, es fundamental no solo para optimizar el aprovechamiento de la capacidad real del botadero, sino también para evaluar los asentamientos remanentes. Esta evaluación resulta clave al considerar su posible uso posterior.

Para propósitos de la presente investigación se ha considerado el uso de los modelos de asentamientos siguientes:

Modelo de Sowers (1973)

En la tesis de grado de (Vásquez Rivera, 2011), para la determinación de Asentamientos Teóricos en Rellenos Sanitarios, considera el modelo propuesto por Sowers (1973) es uno de los más ampliamente utilizados para estimar asentamientos, al distinguir entre la consolidación primaria y la consolidación secundaria. Así mismo, este modelo establece que los asentamientos iniciales ocurren por mecanismos de tipo mecánico, a través del proceso de consolidación primaria.

Los parámetros habitualmente empleados para calcular el Asentamiento primario de residuos sólidos urbanos se derivan del incremento de la presión vertical, considerando el Índice de Compresión Primaria (CC), y el Índice de Compresión Primaria Modificado (Cce). Estos parámetros fueron desarrollados por (Andersen, Balanko, & Lem, 2004).

Estos parámetros se detallan a continuación:

Índice de Compresión Primaria:

$$C_c = \frac{\Delta H (1 + e_0)}{H_c \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_{\text{promedio}}}{\sigma'_0}\right)} \dots\dots\dots(\text{Ec. 02})$$

Índice de Compresión Primaria Modificado:

$$C_{ce} = \frac{C_c}{1 + e_0} \dots\dots\dots(\text{Ec. 03})$$

Donde:

- e0 = índice de vacíos inicial;
- σ'0 = Presión efectiva inicial
- Δσ'0 = Incremento de presión efectiva;
- HC = Altura inicial del Relleno
- ΔH = variación de la altura de relleno

Por lo tanto, el asentamiento primario (ΔH) es el siguiente:

$$\Delta H = H_c C_{ce} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'_{\text{promedio}}}{\sigma'_0}\right) \dots\dots\dots(\text{Ec. 04})$$

Donde:

- ΔH = asentamiento al final de la consolidación primaria
- HC = altura inicial del relleno
- CCe = coeficiente o índice de compresión modificado
- σ'0 = presión efectiva en el relleno
- Δσ'promedio = incremento de presión efectiva

Una vez concluida la primera fase, aproximadamente al cabo de un mes según el modelo de Sowers, se inicia los asentamientos secundarios, generados por procesos físicos, químicos, degradación biológica y deformación mecánica de tipo viscoso, bajo condiciones ambientales estables. Estos asentamientos presentan un comportamiento aproximadamente lineal respecto al algoritmo del tiempo, similar al fenómeno de compresión secundaria, cuya expresión se detalla a continuación:

$$S_s = \frac{C\alpha}{1 + e_0} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \dots\dots\dots(\text{Ec. 05})$$

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad.

h1, h2, = Altura del agua al principio y al final del ensayo.

t = Tiempo transcurrido entre la observación de los niveles h1, h2.

L = Longitud de la zona filtrante.

d = Diámetro de la zona filtrante.

de = Diámetro de la entubación (puede ser igual a d).

$$S_s = H C_{\alpha e} \log \left[\frac{t_2}{t_1} \right] \dots\dots\dots (\text{Ec. 06})$$

Donde: $C_{\alpha e}$ = índice de compresión secundaria modificado

Modelo de Power Creep Law (Edil, 1990)

(Edil, Ranguette, & Wullner, 1990) investigo el modelo Power Creep Law representa una de las aproximaciones más simples para describir la deformación dependiente del tiempo bajo condiciones de carga constante. Esta formulación ha sido ampliamente aplicada para analizar el comportamiento momentáneo o transitorio de diversos materiales empleados en ingeniería (Edil, Ranguette, & Wullner, 1990). El modelo calcular la proporción y magnitud del asentamiento en función del tiempo y del espesor inicial del relleno de residuos sólidos, y se expresa según la siguiente ecuación:

$$\Delta H = H_0 \epsilon(t) = H \Delta \sigma m \left(\frac{t}{t_r} \right)^n \dots\dots\dots (\text{Ec. 07})$$

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad.

h1, h2, = Altura del agua al principio y al final del ensayo.

t = Tiempo transcurrido entre la observación de los niveles h1, h2.

L = Longitud de la zona filtrante.

d = Diámetro de la zona filtrante.

de = Diámetro de la entubación (puede ser igual a d).

En general, el modelo de Power Creep Law predice con precisión la primera fase de la consolidación (compresión primaria); sin embargo, tiende a subestimar ligeramente el asentamiento correspondiente a la etapa posterior (compresión secundaria).

Los parámetros empíricos m y n del modelo de Power Creep Law, se asumirán conforme a los resultados del estudio titulado “Comparación de modelos de predicción de asentamientos aplicado a residuos sólidos”, desarrollado por M. El – Fadel, profesor asociado del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Americana de Beirut, Líbano 1999.

Resultados y Discusión

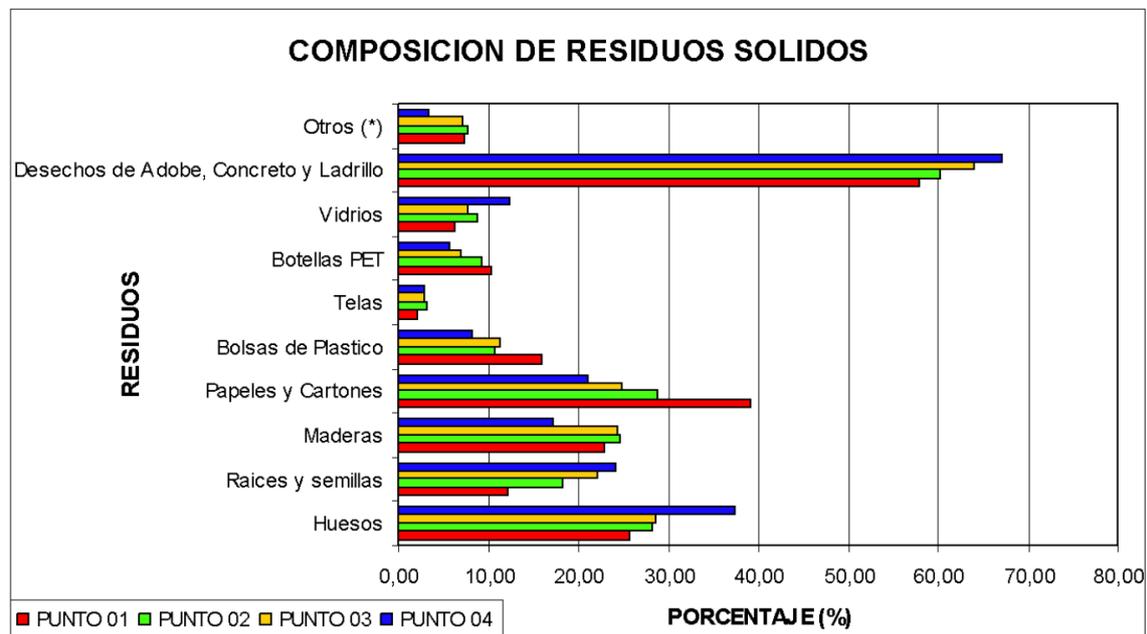
La determinación y estimación de las propiedades geotécnicas de los residuos sólidos urbanos representa un desafío considerable, debido a la elevada heterogeneidad de los materiales que los componen, especialmente al tratarse de un botadero. En el presente estudio se desarrolló una metodología de muestreo orientada a la estimación de parámetros geotécnicos, mediante la ejecución de ensayos en campo incluyendo pruebas a gran escala, como en laboratorio de mecánica de suelos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos

Caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos del Relleno

La caracterización realizada ha permitido identificar los distintos componentes que conforman el relleno de residuos sólidos urbanos del botadero de San Antonio. Tal como se aprecia en la figura correspondiente, el relleno está constituido mayoritariamente mostrada se observa que está conformado por una gran cantidad de desechos de adobe, concreto y ladrillo (demolición), papeles y cartones, huesos y en menor cantidad maderas, raíces y semillas, bolsas de plástico, botellas PET, vidrios y telas.

Figura 2

Composición de los Residuos Sólidos del Botadero



Nota. Se muestra los componentes de los Residuos Sólidos Urbanos, habiéndose tomado las muestras en cada una de las 04 calicatas ejecutadas en la zona de estudio.

La presente investigación para la caracterización de RSU ha desarrollado la metodología propuesta por (Dimitros p., 2005) en la tesis de Doctor de Philosophy, que ha permitido obtener una estimación cuantitativa exacta de la composición de los materiales del relleno, así como la variabilidad de los residuos sólidos urbanos en el Botadero de San Antonio.

Peso Unitario

Desarrollo del ensayo se obtuvieron los resultados siguientes:

Tabla 1

Resumen de Peso Unitario

Ubicación	Peso Unitario (kN/m³)	Peso Unitario (Kg/m³)
PUNTO N° 01	7.88	803.43
PUNTO N° 02	11.94	1,216.63
PUNTO N° 03	9.74	992.42
PUNTO N° 04	8.95	912.71

Nota. Se muestra los resultados del Peso Unitario obtenidos en cada una de las calicatas (04) realizadas en el relleno del Botadero.

Los resultados obtenidos de los Pesos Unitarios en los 04 puntos del Botadero de San Antonio, se encuentran dentro de los resultados obtenidos por (Pelkey Shaun, 1997) en su tesis de Maters Of Science in Civil Engineering, donde se indica que el Peso Unitario varia desde 3.3 kN/m³ en la superficie hasta 12.8 kN/m³ para profundidades mayores a 60 metros.

Contenido de Humedad

Resultados de la evaluación del Contenido de Humedad se obtuvo los resultados siguientes:

Tabla 2

Resumen de Contenido de Humedad

Ubicación	Contenido de Humedad Promedio
PUNTO N° 01	20.30%
PUNTO N° 02	23.36%
PUNTO N° 03	22.56%
PUNTO N° 04	28.17%

Nota. Se muestra los resultados del Contenido de Humedad obtenidos en Laboratorio para cada una de las calicatas (04) realizadas en el relleno del Botadero.

En la presente tesis se ha obtenido resultados del contenido de humedad en los 04 puntos del Botadero de San Antonio, se encuentran dentro de los resultados obtenidos por (Hossain, 2002) en su Thesis Doctor of Philosophy, donde se indica que el contenido de humedad se encuentra desde 15% hasta 40% dependiendo de la composición de los RSU, estación del año, humedad natural y condiciones climáticas, particularmente lluvia.

Análisis Granulométrico

Debido a una amplia variedad de los tamaños de las partículas y naturaleza de los residuos sólidos, se realizó el análisis granulométrico húmedo. Las muestras fueron preparadas guiándose en el procedimiento de ensayo dado en ASTM D 1140 – 54, resultados que se muestran a continuación:

Tabla 3

Resumen de Análisis Granulométrico de cada Punto

Ubicación	Clasificación SUCS
PUNTO N° 01	SM
PUNTO N° 02	SM
PUNTO N° 03	SM
PUNTO N° 04	SM

Nota. Se muestra los resultados del contenido de humedad obtenidos en laboratorio para cada una de las calicatas (04) realizadas en el relleno del botadero.

Se ha procedido a desarrollar el análisis granulométrico de acuerdo con lo señalado por (Landva & Clark, 1990), de cada uno de los componentes, siendo de gran utilidad para la clasificación o caracterización de RSU del botadero de San Antonio.

Permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad se obtuvo en campo, a través del ensayo a gran escala, debido a la heterogeneidad de los materiales.

Tabla 4

Resumen de Resultados del Ensayo de Permeabilidad

Ubicación	Permeabilidad K (cm/s)
PUNTO N° 01	1.63×10^{-4}
PUNTO N° 02	4.24×10^{-4}
PUNTO N° 03	1.74×10^{-4}

Nota. Se muestra los resultados del Ensayo de Permeabilidad practicado y obtenido In Situ, en cada uno de los puntos donde se ha emplazado los dados de concreto (03) sobre el relleno del Botadero.

(Pelkey Shaun, 1997) señala que conocer las características hidráulicas de un RSU son importantes en el diseño de un sistema efectivo de control de lixiviados para un vertedero, en la presente investigación los valores obtenidos en este ensayo se encuentran dentro del rango establecido en la Tesis de Pelkey, siendo este rango de 10^{-2} a 1.5×10^{-4} cm/s.

Temperatura

La temperatura fue estimada mediante la instalación de un termómetro electrónico en cada uno de los ensayos de hoyo, ubicados a profundidades entre 0.25 m a 1.1 m. Los valores registrados oscilaron entre 16.3 °C y 20.2 °C, siendo comparables a la temperatura ambiente.

En la tesis de (Mateos García, 2003) señala que la temperatura oscila entre 40 °C y 60 °C a poca profundidad y que no se muestra la influencia de la temperatura exterior, los resultados para nuestro caso la temperatura no está dentro de los indicado por (Mateos García, 2003) por que, el tema altitudinal afecta la temperatura.

Monitoreo de Asentamiento de Dados de Concreto

El asentamiento por consolidación de los residuos sólidos urbanos en el botadero de San Antonio, provocado por el peso propio de los residuos sólidos y por cargas externas, ha generado deformaciones que fueron monitoreadas mediante mediciones directas de nivelación a lo largo de un periodo de 372 días. Los valores obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 5

Resumen de Asentamientos Monitoreados en Dados de Concreto

Elemento	Asentamiento (cm)
Dado 01	21.14
Dado 02	19.38
Dado 03	13.12

Nota. Se ha realizado el monitoreo del asentamiento de los dados de concreto (03 unidades). En la tabla se muestra el resultado del asentamiento al final de 372 días.

Determinación del Asentamiento con Modelo Predictivo de Sowers

Se ha empleado el modelo predictivo de asentamiento de Sowers, y se ha realizado la comparación con las mediciones de los asentamientos monitoreados en campo durante 372 días, obteniéndose resultados mostrados a continuación.

Tabla 6

Comparación Asentamiento Modelo de Sowers versus Monitoreo de Asentamiento Real (periodo 372 días)

COMPARACIÓN ASENTAMIENTOS PERIODO 372 DÍAS		
Elemento	Modelo de Sowers (cm)	Asentamiento real campo (cm)
Dado 01	21.83	21.14
Dado 02	19.916	19.24
Dado 03	14.118	13.12

Nota. Cuadro comparativo entre el Asentamiento Teórico (modelo de Sowers) versus Asentamiento en Campo (monitoreo In Situ) luego de un periodo de 372 días.

Espinace, Palma y Szanto (2006) señalan que el asentamiento a largo plazo, se dará a través de la compresión secundaria que es mucho mayor que otras compresiones y algunas veces es difícil hacer una distinción entre la compresión primaria y secundaria. En la presente investigación se ha desarrollado el modelo de predicción el mismo que se ha contrastado con la medición de los datos de concreto para un periodo de 372 días, siendo los resultados muy aproximados entre sí.

Determinación del Asentamiento con Modelo de Power Creep Law

La aplicación de este modelo permitió contrastar los resultados los resultados obtenidos con los asentamientos reales monitoreados en campo. Para implementar el modelo de Power Creep Law, se sumieron parámetros de compresibilidad dentro de rangos máximos y mínimos, tomando como referencia el estudio realizado por el profesor M. El Fadel. A partir de ello se obtuvieron los resultados siguientes:

Tabla 7

Comparación de Modelo de Sowers (Índices de compresibilidad de Sowers) versus Asentamiento Real en Campo a 372 días

COMPARACIÓN ASENTAMIENTOS 372 DÍAS			
Elemento	Modelo de Power Creep Law (cm)		Asentamiento real campo (cm)
	Rango Mayor	Rango Menor	
Dado 01	66.299	6.687	21.40
Dado 02	50.214	5.064	19.24
Dado 03	20.949	2.113	1.12

Nota. Cuadro comparativo entre el Asentamiento Teórico (modelo de Power Creep Law) versus Asentamiento en Campo (monitoreo In Situ) luego de un periodo de 372 días.

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo predictivo de Power Creep Law, tienen un rango donde el asentamiento real de medición en campo se encuentra dentro de los rangos establecido con el modelo predictivo utilizado.

Adicionalmente se ha determinado otras propiedades geotecnicas del relleno de residuos sólidos urbanos del Botadero de San Antonio, siendo estos los siguientes:

Parámetros Resistentes

Ensayo de Penetración Estándar (SPT). Los resultados obtenidos en este ensayo han permitido evaluar las condiciones de resistencia a la penetración del botadero, permitiendo zonificarlo de acuerdo a la resistencia presentada por el relleno, identificando 02 sectores: zona de resistencia débil y zona de resistencia relativamente regular.

Tabla 8

Resumen de Valores Obtenidos del Ensayo SPT

SONDEO N°	ÁNGULO DE FRICCIÓN	PROFUNDIDAD (m)
S - 01	20° - 23,9°	0,30 - 5,40
S - 02	21,6° - 32,7°	0,30 - 6,00
S - 03	33,9° - 32,6°	0,30 - 2,70
S - 04	24,8° - 23,3°	0,30 - 5,40
S - 05	19,2° - 33°	0,30 - 3,30

Nota. Resultados de SPT que permitieron determinar el nivel de resistencia del Relleno de Residuos Sólidos Urbanos del Botadero de San Antonio.

(Espinace Abarzua, Palma G., & Valenzuela T., Análisis de la estabilidad derellenos sanitarios, 2006) realizaron una comparación y compilación de los parámetros resistentes publicados en la literatura especializada, derivados de investigaciones a escala de laboratorio, ensayos In Situ y retro caculos (back análisis) de casos de roturas reales, concluyendo con una banda de parámetros resistentes recomendados para el diseño. Los resultados obtenidos en la presente investigación se encuentran dentro de la banda de parámetros resistentes.

Ensayo de Penetración Dinámica Liviana (PDL). Debido a su simplicidad, bajo peso y capacidad de penetración, este tipo de ensayo permitió determinar la resistencia del relleno frente a la penetración, obteniéndose los parámetros ϕ y C.

La prueba se ha realizó junto a los datos de concreto, utilizando el hoyo previamente excavado, tras culminar el ensayo de hoyo (Test Pit). Se ejecutaron en total cuatro (04) ensayos de Penetración Dinámica Liviana (PDL); distribuidos de la siguiente manera: tres (03) sobre los dados de concreto y un (01) ensayo en un punto adicional dentro de la zona muestral. Los resultados de estos ensayos se muestran a continuación:

Tabla 9*Resumen de Valores con Ensayo PDL*

SONDEO N°	ÁNGULO DE FRICCIÓN	PROFUNDIDAD (m)
Punto 01	19,5° - 23,8°	0,30 - 1,20
Punto 02	19,2° - 30,1°	0,30 - 2,10
Punto 03	18,9° - 24,3°	0,30 - 2,70
Punto 04	18,5° - 24,3°	0,30 - 2,70

Nota. Resultados de SPT que permitieron determinar el nivel de resistencia del Relleno de Residuos Sólidos Urbanos del Botadero de San Antonio.

Con los valores conocidos como son: dimensiones de los dados de concreto y parámetros geotécnicos del relleno de residuos sólidos, se ha realizado el análisis de retro cálculo (Back análisis), mediante el empleo de la ecuación de Terzaghi de capacidad de carga, lo que ha permitido estimar el ángulo de fricción asumiendo la cohesión cero.

Tabla 10*Resumen de Parámetros de Capacidad de Carga (retro calculo)*

SONDEO N°	ÁNGULO DE FRICCIÓN
Punto 01	13,13°
Punto 02	8,21°
Punto 03	10,99°

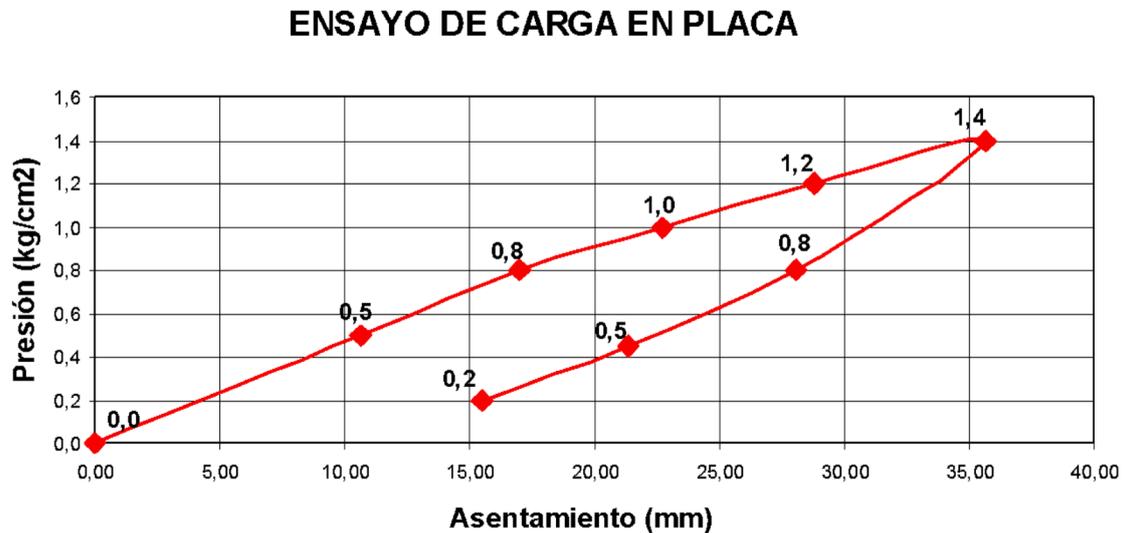
Nota: Resultados de SPT que permitieron determinar el nivel de resistencia del Relleno de Residuos Sólidos Urbanos del Botadero de San Antonio.

A partir de los resultados obtenidos en campo y el análisis por retro cálculo basado en la carga aplicada sobre los dados de concreto, se determinaron los parámetros de capacidad de soporte del botadero. Cabe destacar que también se cuenta con información sobre los asentamientos reales registrados en campo, los cuales fueron generados por las cargas aplicadas sobre el relleno, distribuidos estratégicamente en tres (03) puntos representativos.

Ensayo de Carga en Placa. Este es uno de los ensayos más empleados, por medio se este ensayo se ha estimado el asentamiento producido ante una carga aplicada cuyos valores son los siguientes:

Presión aplicada: 1.4 kg/cm²

Asentamiento: 35.63 mm.

Figura 3*Esfuerzo – Deformación (Carga en Placa)*

Nota. Resultados del ensayo de Carga en Placa, el mismo que permitió conocer In Situ el Asentamiento del Relleno de Residuos Sólidos Urbanos del Botadero de San Antonio.

(Espinace Abarzua, Palma G., & Valenzuela T., Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios, 2006) señalaron que el ensayo de carga en placa sobre rellenos sanitarios es uno de los ensayos más empleados, debido a la heterogeneidad de los RSU y su deformabilidad. Los resultados obtenidos del asentamiento son mayores que los asentamientos precedidos con los 02 modelos de predicción.

Conclusiones

Resulta necesario señalar que este es el primer trabajo de investigación a nivel regional y nacional de caracterización geotécnica (GEOTECNIA AMBIENTAL) y su asentamiento de Residuos Sólidos Urbanos en un botadero, debiéndose de tener en consideración que este medio de disposición final es inadecuado, donde los RSU se colocan sin tratamiento alguno, sino de manera integral.

Como resultado de la caracterización de los componentes de los Residuos Sólidos Urbanos, se ha cuantificado individualmente el porcentaje promedio de residuos orgánicos es de 11.86 % mientras que el de residuos inorgánicos es de 88.14 %. A partir de estos valores, se concluye que los fenómenos de asentamiento presentes en el botadero ocurren de forma lenta y tienen magnitud cuantitativamente reducida.

Se ha demostrado que la estimación de las propiedades geotécnicas de los residuos sólidos urbanos puede llevarse de manera eficaz mediante la aplicación de métodos tradicionales de la mecánica de suelos. Para tal fin, se han ejecutado ensayos tanto en campo (In Situ) como en laboratorio, concluyéndose su elevada efectividad en la caracterización del comportamiento del relleno. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 11*Resumen de Resultados de Parámetros Geotécnicos de Residuos Sólidos*

ENSAYOS	Punto 01	Punto 02	Punto 03	Punto 04
Peso Unitario (kN/m)	7.88	11.94	9.74	8.95
Contenido de Humedad (w%)	20.3	23.36	22.56	28.17
Análisis Granulométrico (SUCS)	SM	SM	SM	SM
Permeabilidad (cm/s)	1.63 X 10 ⁻⁴	4.24 X 10 ⁻⁴	1.74 X 10 ⁻⁴	-----
Temperatura (°C)	17.43	17.60	18.73	19.03

Nota. Resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio del Relleno de Residuos Sólidos Urbanos del Botadero de San Antonio.

Los valores obtenidos mediante la aplicación de los modelos predictivos de asentamiento: Sowers y Power Creep Law fueron comparados con los asentamientos reales medidos en campo, específicamente sobre los dados de concreto. Los resultados permiten concluir que el modelo de Sowers ofrece una mayor proximidad a los valores del asentamiento observados en campo, mientras que el modelo Power Creep Law presenta estimaciones extremas, ya sea por exceso o por defecto, en relación con los datos reales.

Se llevaron a cabo ensayos de penetración estándar (SPT) y de penetración dinámica (PDL), los cuales permitieron evaluar la resistencia del relleno frente a la penetración a distintas profundidades. A partir de los resultados del SPT se identificaron cualitativamente dos (02) zonas diferenciadas según la resistencia del relleno de residuos sólidos urbanos. En cuanto al ensayo PDL, se realizó un análisis por Retrocálculo con el fin de estimar los parámetros resistentes del relleno. Esta prueba se ejecutó en proximidad a los dados de concreto, donde también se llevaron a cabo las mediciones del asentamiento.

En consecuencia, el ensayo de carga en placa permitió evaluar la respuesta del relleno ante una carga actuante, caracterizando su comportamiento esfuerzo – deformación (asentamiento). Por lo tanto, se concluye que los ensayos de SPT, PDL y Carga en Placa permiten determinar el asentamiento del botadero, ya sea mediante la resistencia del relleno frente a la penetración o a través de su reacción ante cargas externas aplicadas.

Finalmente se propone como alternativas de reinserción y usos del botadero, dar un uso forestal en forma permanente, así mismo deberá de ser monitoreado en forma permanente el asentamiento del relleno, emisión de lixiviados y biogás. No es viable la construcción de viviendas hasta que el relleno alcance su consolidación final, el mismo que deberá de monitorearse permanentemente.

Declaración de Conflicto de Intereses

Los autores declaran no presentar ningún tipo de conflicto de intereses.

Referencias

- Andersen, E. O., Balanko, L. ", & Lem, J. M. (13-17 de Abril de 2004). *Field monitoring of the compressibility of municipal solid waste and soft alluvium*. New York. Obtenido de <https://scholarsmine.mst.edu/icchge>
- Bernardo, C., Eugenio, G., Yamin, L. E., & Soler, N. (2002). *The landslide of Dona Juana landfill in Bogota. A case study. Rio de Janeiro, Brasil*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/274194377>
- Dimitros P., Z. (2005). *Evaluation of static and Dynamic properties of Municipal solid waste*. Doctor of Philosophy thesis, University of California, Berkeley. Obtenido de <https://www.geoengineer.org>
- Edil, T. B., Ranguette, V. J., & Wullner, W. W. (1990). *Geotechnics of waste fills - Theory and practice: ASTM STP 1070*. American society for testing and materials, Philadelphia, 225-239. doi:<https://doi.org/10.1520/STP25309S>
- El Fadel, M., Shasbak, S., Salaby, E., & Leckie, J. (2002). *Comparative assessment of settlement models for municipal waste landfill applications*. Waste Management & Research 2002. doi:<https://doi.org/10.1034/j.1399-3070.1999.00059.x>
- Espinace Abarzua, R., Palma G., J. H., & Valenzuela T., P. (2006). *Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios*. Punta Este, Uruguay.
- Eugeniuz, K., Osinski, P., Podlasek, A., Markiewicz, A., Winkler, J., & Vaverkova, M. D. (2023). *Geoenviromental approaches in an old municipal waste landfill reclamation process: Expectations vs reality*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101273>
- Fahin, F., & Sohel, M. (2021). *Identification of geotechnical propierties of landfill solid waste*. Dacca, Bangladesh: Universidad internacional de negocios, agricultura y tecnologia. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/381650193>
- Fassett, J., Leonards, G., & Reppeto, P. (1994). *Geotechnical properties of munipal solid waste and their use in landfill desing*. Proc. Waste Tech '94, Solid Waste Association of North America, Silver Springs, Maryland, 1-31.
- Feng, S.-J., Ke-Wei, G., Chen, Y.-X. L., Zhang, L., & Chen, H. (2017). *Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China*. Waste Management, 63, 354-365. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.016>
- Landva, A. O., & Clark, J. L. (1990). *Geotechnis of waste fills - Theory and Practice*. Philadelphia: ASTM.
- Lemos Machado, S., Karimpour-Fard, M., Shariatmadari, N., Carvalho, M. F., & C.F. do Nascimento, J. (2010). *Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian Landfills*. Elsevier. doi:<https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.019>

- Mateos García, T. (2003). *Características geotécnicas de los residuos sólidos urbanos (RSU)*. Master en mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones.
- Mondelli, G., Giacheti, H. L., & Elis, V. R. (2012). *Geo-Environmental site investigation for municipal solid waste disposal sites*. Institute for technological research of Sao Paulo, Brazil. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/224830047>
- Naveen, B. P. (2018). *Measurement of static and dynamic properties of municipal solid waste at Mavallipura landfillsite, India*. doi:<https://doi.org/10.1186/s40703-018-0088-9>
- Okonta, F. N., Tchani-Nankoue, F., & Karimi, B. (2024). *In situ and laboratory geotechnical properties of municipal solid waste from south eastern Johannesburg*. KSCE Journal of Civil Engineering, 28, 3151-3161. doi:<https://doi.org/10.1007/s12205-024-1272-4>
- Owusu-Nimo, F., Oduro-Kwarteng, S., Essadoh, H., Wayo, F., & Shamudeen, M. (2012). *Characteristics and management of landfill solid waste in Kumasi, Ghana*. Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00052>
- Pelkey Shaun, G. (1997). *Geotechnical properties of municipal solid waste*. Master Thesis, The university of new brunswick. Obtenido de <https://hdl.handle.net/1882/766>
- Penmethsa Kiram, K. (2007). *Permeability of municipal solid waste in bioreactor landfill with degradation*. Thesis Master of science in civil engineering, The University Texas at Arlington. Obtenido de https://mavmatrix.uta.edu/civilengineering_theses/145
- Reddy, K. R., Hettiarachchi, H. P., Gangathulasj, J., & Bogner, J. E. (2009). *Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA*. Elsevier, 29, 952-959. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.05.011>
- Sandoval-Vallejo, E. A., Ramirez-Tascon, A., & Cuaran, D. (2015). *Shear strength of landfills*. Medellín. Obtenido de <https://dyna.medellin.unal.edu.co/>
- Singh, V., & Uchimura, T. (2023). *Effect of material composition on geotechnical properties - Study on synthetic municipal solid waste*. MDPI. doi:<https://doi.org/10.3390/geotechnics3020023>
- Vásquez Rivera, I. (2011). *Determinación de asentamientos teóricos en rellenos sanitarios*. Tesis de grado en la escuela de Ingeniería en construcción del instituto tecnológico de Costa Rica. Obtenido de <https://api.core.ac.uk/oai/oai:repositoriotec.tec.ac.cr:2238/6094>

Apéndice

Anexo A. Evidencias fotográficas de Ensayos Geotécnicos

Figura A1

Clasificación visual de componentes de residuos sólidos



Nota. Segregación y porcentajes de contenidos de Residuos Orgánicos e Inorgánicos, del material extraído (calicatas) de cada uno de los puntos muestrales en el Botadero de San Antonio de Cusco.

Figura A2

Cálculo de Peso Unitario _ Ensayo de Hoyo (Test Pit)



Nota. Ensayo de Hoyo (Test Pit), el mismo que se desarrolló en cada uno de los puntos muestrales, con la finalidad de conocer el Peso Unitario del Relleno de RSU en el Botadero de San Antonio de Cusco.

Fotografía A3

Toma de temperatura con termómetro digital a diferentes profundidades



Nota. Toma de Temperatura para conocer esta variable a diferentes estratos del Relleno de RSU del Botadero de San Antonio de Cusco.

Fotografía A4

Tamizado convencional con material pasante la malla de 20 mm



Nota. Con el Material Inorgánico (suelo) se ha desarrollado el ensayo granulométrico convencional de Mecánica de Suelos, material resultado del depósito de demoliciones de viviendas, el mismo que ha sido utilizado para la cobertura del Relleno de RSU del Botadero de San Antonio de Cusco.

Fotografía A5

Secado en espacio abierto de la muestra de residuo sólido urbano



Nota. Se ha realizado un primer sacado en espacio abierto de las muestras extraídas del Relleno de RSU y luego se ha llevado al horno para el secado final y determinar el contenido de humedad del Relleno de RSU del Botadero de San Antonio de Cusco.

Fotografía A6

Ensayo de SPT en zonas del relleno del Botadero



Nota. Se desarrollo ensayos de SPT, con la finalidad de determinar la resistencia del relleno del Botadero de San Antonio de Cusco.

Fotografía A7

Ensayo de carga en placa lecturas de cada uno de los diales de deformación



Nota. Ensayo de Carga en Placa, con la finalidad de determinar la deformación (asentamiento) del relleno del Botadero de San Antonio de Cusco.

Fotografía A8

Medición o monitoreo del asentamiento de los dados de concreto durante un periodo de 372 días



Nota. Desarrollo de monitoreo del asentamiento de cada uno de los dados de concreto, instalados en el del relleno del Botadero de San Antonio de Cusco.