

# **EVOLUCION DE LA GEOTECNIA AMBIENTAL APLICADA A LOS RELLENOS SANITARIOS**

**R. Espinace A; J. Palma G; M. Szanto N.**

Académicos Escuela de Ingeniería en Construcción. U. Católica de Valparaíso

## **RESUMEN**

En el presente artículo se presentan las principales actuaciones de la geotecnia ambiental en las diversas etapas del diseño, construcción, operación y rehabilitación de rellenos sanitarios. Se revisan las principales tendencias en cuanto a modelos que representen la compresibilidad y el comportamiento esfuerzo deformacional.

También se presentan algunas aplicaciones realizadas durante la construcción de rellenos sanitarios en Chile y finalmente se dan a conocer los principales proyectos de rehabilitación de estas áreas impactadas por el vertido de residuos sólidos domiciliarios principalmente en la ciudad de Santiago.

## **INTRODUCCION**

Entre los métodos más conocidos para disponer los residuos sólidos, actualmente se considera a los rellenos sanitarios como la mejor solución técnica, económica y sanitaria. De hecho es la solución mayoritaria en los países desarrollados, a pesar de los esfuerzos por generar sistemas alternativos. Se estima que actualmente los países desarrollados disponen en estos rellenos cerca del 80% de los residuos recolectados, mientras que en América, aún cuando estas cifras son menores, también es el método más empleado.

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería, en la que se emplean técnicas y maquinaria de movimiento de tierras para construir rellenos artificiales. Los residuos sólidos empleados como material principal del relleno, tienen un elevado potencial contaminante que se refleja principalmente en la producción de lixiviados y biogas. Las características y heterogeneidad de estos residuos, influyen en aspectos geotécnicos como la compresibilidad, la capacidad portante y la estabilidad. Por ello, en la actualidad existe una creciente participación de los profesionales geotécnicos en las etapas de elección del emplazamiento, diseño, construcción, cierre, sellado y reinsertión de rellenos sanitarios. Estos trabajos se desarrollan dentro de la línea que se ha denominado "Geotecnia o Geotecnología Ambiental", que es el encuentro entre la geotecnia clásica y las ciencias ambientales, cuyas primeras presentaciones realizadas por estos autores fueron en 1989 en el Laboratorio de Geotecnia del

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) de España (Espinace, R. Palma, J., 1990).

En cuanto cifras de producción de residuos sólidos y gastos de su disposición final, se puede citar que en la Región Metropolitana de Chile, la producción pasó de 0,64 kg./hab/día en 1985 a 0,75 kg./hab/día en 1991 y a 0,80 kg./hab/día en 1993. Los costos de inversión y operación, van desde 5 a 9 dólares por tonelada dispuesta para los residuos recolectados por los municipios y de 17 hasta sobre 40 dólares en el caso de tarifas canceladas por particulares. En las ciudades latinoamericanas la producción de desechos puede variar entre 0,35 y 1,0 kg. por habitante cada día, mientras que en los países desarrollados los máximos pueden alcanzar hasta 3 kg. por habitante cada día. Los costos en estos países desarrollados van desde 12 a 36 dólares por tonelada dispuesta, para residuos municipales dispuestos en rellenos sanitarios. Necesariamente en los próximos años estos costos se incrementarán, debido al aumento en la cantidad y variación de las características de los desechos y debido a las restricciones medioambientales que exige el desarrollo sustentable.

Todos estos antecedentes permiten deducir que estamos en presencia de una obra civil de un importante costo, donde la geotecnia tiene una activa participación tanto en el proyecto, como en su ejecución y operación.

### **ASPECTOS GEOTÉCNICOS EN VERTEDEROS SANITARIOS CONTROLADOS**

La Geotecnia aplicada a rellenos sanitarios tiene una activa participación tanto en las etapas de estudio previo a la selección de un lugar destinado a relleno sanitario, como en las de diseño, de construcción de las obras de partida; de operación; de cierre y rehabilitación de antiguos vertederos. En general el estudio geotécnico debe cubrir aspectos relacionados con:

- Estabilidad: es indispensable contar entre otros aspectos con un adecuado conocimiento de la capacidad portante y la deformabilidad del suelo de fundación de las obras de partida, la estabilidad de los taludes naturales o artificiales, riesgo deformacional del suelo, riesgo de colapso y fenómenos geológicos activos o reactivables.
- Previsiones sobre materiales: es preciso contar con información acerca de la facilidad para la excavación, disponibilidad de préstamos para suelo de cobertura, calidad del suelo de cobertura disponible y el potencial de mejoramiento del efecto sellante del subsuelo. También es importante conocer la composición geológica local y general, incluyendo información de características morfológicas, estructura, extensión y edad geológica del estrato superficial, estructuras tectónicas, e investigar en profundidad si el subsuelo está compuesto de rocas solubles o cavidades.
- Condiciones hidrogeológicas: por ser el agua el vehículo más activo de difusión de contaminantes en el terreno y por la necesidad de proteger el agua como recurso, se debe conocer la distribución de aguas freáticas, acuíferos y acuíclulos con sus propiedades hidráulicas.

- Utilidad del suelo de cimentación como barrera natural por su baja permeabilidad, adecuado espesor y continuidad.
- Análisis de la compresibilidad y tiempo de estabilización en las deformaciones de los rellenos, con el propósito de contribuir a la determinación de la vida útil y de futuros usos de los vertederos sanitarios.
- Determinación de la resistencia del relleno, así como la evolución de los parámetros resistentes con el tiempo.
- El análisis de la estabilidad de taludes en vertederos, particularmente en lugares de topografía accidentada, donde es necesario recurrir a diseños que cuentan con taludes importantes.

#### **EVOLUCIÓN EN LA APLICACIÓN DE CRITERIOS GEOTÉCNICOS.**

La necesidad de proteger el entorno del potencial contaminante de los residuos y particularmente de los lixiviados y gases generados, obliga a confinar el vertedero de manera que no se produzca ningún tipo de migración de gases o lixiviados por el fondo, paredes laterales o por la superficie.

En las situaciones en que no se cuenta con un suelo natural suficientemente impermeable, y no sea admisible la contaminación de aguas o suelos que el vertedero ocasionaría, se ha de disponer una **barrera impermeable** que ejerza esa función. Las barreras deben evitar también la infiltración de agua de escorrentía superficial y de precipitaciones al relleno.

Entre los materiales comúnmente empleados en la confección de sellos está el suelo arcilloso compactado en capas con coeficientes de permeabilidad inferiores a  $10^{-7}$  m/s y las geomembranas con coeficientes de permeabilidad de  $10^{-12}$  m/s a  $10^{-14}$  m/s. La permeabilidad del suelo disminuye con adiciones, que pueden ser de polímeros, cemento, asfalto o arcillas puras como bentonita. También se han utilizado sellos combinados con hormigón hidráulico y hormigón asfáltico. En los últimos años se han desarrollado diversas geomembranas, las cuales tienen permeabilidades menores que los materiales antes citados, pero debido a sus características deben ser dispuestas en conjunto con suelo compactado y/o mejorado.

Por otro lado, los residuos sólidos depositados en un vertedero sufren grandes asientos, con lo cual su volumen disminuye y la capacidad del vertedero aumenta. La importancia de cuantificar los asientos que se producen y el tiempo que se extenderán se debe, no solo al aprovechamiento que se puede hacer de la capacidad real del vertedero, sino también de las previsiones a realizar durante la fase de diseño. Así mismo, **la evaluación de los asientos** tiene gran importancia a la hora de definir la posible utilización posterior del vertedero. El ritmo de producción de asientos en un vertedero es variable con la edad, presentando velocidades de asiento que disminuyen con el tiempo, pero que en todo caso se mantienen perceptibles durante años. Hirata et. Al(1995) plantean que en vertederos con alto contenido de residuos orgánicos, los asientos son importantes durante los primeros 10 años.

Gran parte de las investigaciones sobre el tema de la compresibilidad se han basado en el planteamiento propuesto por Sowers (1973), quien establece que los asentamientos producidos por mecanismos mecánicos, se pueden determinar mediante la expresión de la teoría de la consolidación primaria:

$$S_p = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 \log\left(\frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}\right) \quad (1)$$

Donde:

- $S_p$  = asiento al final de la consolidación primaria
- $H_0$  = altura inicial del relleno
- $C_c$  = coeficiente de compresibilidad
- $\sigma_{v0}$  = presión efectiva en el relleno
- $\Delta\sigma_{v0}$  = sobrecarga efectiva
- $e_0$  = índice de vacíos

Terminada la primera fase aproximadamente al cabo de un mes según Sowers, los asentamientos producto de cambios físico químicos, degradación biológica y compresión mecánica secundaria, en condiciones ambientales estables tienen un comportamiento más o menos lineal con el log. del tiempo, similar a la compresión secundaria de suelos y se determinan mediante la teoría de la consolidación secundaria, aplicando la expresión:

$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

Donde:

- $S_s$  = asiento durante la consolidación secundaria al tiempo  $t_2$
- $H$  = altura de la celda al tiempo  $t_1$
- $C_\alpha$  = índice de compresión secundaria
- $e_0$  = índice de vacíos
- $t_2$  = tiempo de estimación de asentamientos
- $t_1$  = tiempo de inicio de la consolidación secundaria

La obtención del coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ ) y del índice de compresión secundaria ( $C_\alpha$ ) se hace a partir de la relación de estos parámetros con el índice de poros ( $e_0$ ) en los gráficos propuestos por Sowers (1973) presentados en la figura 1. Estos parámetros han sido contrastados con experiencias chilenas, arrojando una adecuada correlación cuando se trata de residuos con alto contenido de materia orgánica. Este criterio ha sido el más empleado hasta ahora, tanto en Chile como el extranjero para predecir los asentamientos en un relleno sanitario.

**FIGURA 1:** Determinación del índice de compresión y coeficiente de compresión secundaria en un relleno sanitario. Cartier y Baldit (1983)

Una conclusión interesante es que la compresión primaria es dominante en la producción de asientos en la fase de operación del vertedero y la compresión secundaria es la más evidente una vez que se ha concluido el relleno.

Con posterioridad al planteamiento de Sowers se han desarrollado una serie de modelos conducentes al estudio de la compresibilidad de los rellenos. La mayoría de ellos se basa en las hipótesis iniciales planteadas por dicho autor. Una excepción a esto lo constituye el trabajo de Zimmerman, Chen y Franklin (1977), quienes plantean una ley de comportamiento que considera dos niveles de porosidad (macro y micro porosidad) en los residuos, y proponen una relación de la disipación de la presión intersticial con el tiempo.

Rao et al (1977), realizaron estudios en terreno y laboratorio, desarrollando una técnica para predecir asientos en vertederos sometidos a sobrecarga. Además estudiaron la estabilización mediante inyección al relleno de cenizas volantes.

Por otra parte Souza y Rodríguez (1980) estudiaron la compresibilidad de un vertedero, considerando la forma de disposición de las basuras. Para ello se utilizaron dos sistemas diferentes. El primero consistió en depositar las basuras desde la parte superior de un talud, para luego compactar con maquinaria pesada desde arriba hacia abajo. En el segundo sistema empleado, se depositaba la basura el pie del talud y se compactaba en tongadas con la misma maquinaria. Con ambos sistemas se realizaron mediciones de asentamiento, disminuyendo estos de un 17 a un 5%, si se utilizaba el segundo método de compactación, lo que deja de manifiesto la importancia del proceso constructivo y de operación, tema al que no se le ha dado la debida importancia en Chile.

Booker y Ham (1982), han estudiado el grado de descomposición de los residuos sólidos en rellenos sanitarios de U.S.A., para distintas condiciones y situaciones geográficas, llegando a desarrollar un método para conocer el grado de estabilización

de la basura, útil para ayudar a predecir asentamientos, sobretodo en países como el nuestro con importantes diferencias geográficas y climáticas.

Cartier y Baldit (1983) proponen una ley de variación de la densidad en función de la profundidad, de acuerdo a mediciones realizadas con densímetro nuclear. Además proponen parámetros para residuos sólidos, los que son de gran utilidad para aplicar el modelo propuesto por Sowers (1973) y han sido empleadas en algunos diseños de vertederos en Chile, aun sin una adecuada contrastación.

Así mismo Landva y Clark (1990), recomiendan el empleo de rellenos de prueba para evaluar la compresibilidad de los vertederos. Estos ensayos a gran escala son muy eficaces y su costo puede ser relativamente bajo, mientras que los ensayos geotécnicos convencionales de laboratorio, generalmente no son aplicables para rellenos de basuras, principalmente por el tamaño y heterogeneidad de estos materiales. Con anterioridad a esta proposición la Universidad Católica de Valparaíso ya había realizado experiencias de este tipo, durante las etapas de operación de los vertederos sanitarios El Molle de Valparaíso y Limache de la V Región (Espinace et al. 1989).

En las investigaciones realizadas en este último vertedero sanitario de baja densidad se midieron asentamientos de alrededor del 30% de la altura inicial al cabo de 7 años. Estos valores coinciden con aquellos observados en otros rellenos sanitarios de Chile, tales como "La Feria" o "Lo Errazuriz" en Santiago (Espinace et al, 1991). Según Hinkle(1990) en sus investigaciones se llega a asentamientos finales alrededor del 30% de la altura del relleno.

Entre otras alternativas propuestas para el estudio de asentamientos en vertederos destacan la ley exponencial propuesta por Gandolla (1992), y el modelo Meruelo, de reciente publicación (Arias, 1994 - Palma, 1995). En el caso del modelo Meruelo, se debe resaltar que es el único modelo que considera en su planteamiento inicial y en su formulación a los fenómenos de degradación de la materia orgánica como causantes de los asentamientos no debidos a sobrecargas externas que se producen en vertederos controlados. Este modelo que es uno de los más avanzados, ha sido desarrollado en España, en virtud de un convenio entre la Universidad Católica de Valparaíso y la Universidad de Cantabria - España.

**La capacidad de soporte de un relleno sanitario**, en general es reducida y dependerá de factores como espesor del suelo de cobertura, composición de los residuos sólidos depositados, método de construcción y maquinaria utilizada entre otros. El factor más significativo es el espesor relativo de la capa superficial de suelo sobre el relleno sanitario más esponjoso y flexible. Cuando la cimentación es relativamente pequeña comparada con el espesor del suelo de cobertura o capa superficial, puede punzonar a través de la capa superficial y hacia el interior del relleno de residuos. Cuando la cimentación es algo mayor y el relleno de residuos no es significativamente menos débil que la capa superficial superior, la rotura puede ocurrir por rotación de un segmento de suelo de cobertura y del relleno actuando como unidad (Sowers, 1968).

La capacidad de soporte de los vertederos según este autor está entre 0,25 y 0,40 kg/cm<sup>2</sup>, advirtiéndose que los ensayos de placa de carga con placas pequeñas pueden ocasionar impresiones equivocadas respecto de la capacidad de soporte de un relleno. Para Cartier y Baldit (1983) la capacidad portante está entre 0,25 y 1 kg/cm<sup>2</sup>.

Entre las experiencias desarrolladas en terreno, más conocidas en Chile, están los ensayos de penetración siendo los más ampliamente utilizados los de penetración dinámica. Estos permiten hacer evaluaciones cualitativas de la resistencia relativa del relleno a diferentes profundidades. Además repitiendo su realización periódicamente, se pueden contrastar ensayos realizados en diferentes ocasiones, lo que permite evaluar la variación de las características resistentes de un relleno en el tiempo o por un tratamiento de mejora. Resultados de esta aplicación fueron presentados por estos autores en el IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, observándose que aún cuando el relleno prospectado puede ser muy heterogéneo, la serie de puntos de ensayo de un mismo sector arrojan resultados coherentes entre sí, lo que indica que la masa se comporta como un todo homogéneo, salvo en aquellos sectores en los que se encuentran residuos de características distinta a los residuos sólidos domiciliarios o residuos de grandes volúmenes. Los ensayos de penetración dinámica realizados en el relleno sanitario "El Molle" de Valparaíso entre los años 1986 y 1990 para determinar su vida útil, no mostraron variaciones significativas en la resistencia a la penetración, lo que indica que el proceso de estabilización del vertedero es lento. En general la resistencia a la penetración dinámica de los residuos es baja, excepto en zonas del relleno con singularidades.

En Francia se han utilizado penetrómetros estáticos (Gouda) y presiómetros en el relleno sanitario de d'Arnouville-lès-Mantes (Cartier y Baldit, 1983). Los autores concluyen que ensayos de penetración estática pueden ser de utilidad para identificar zonas relativamente débiles dentro del vertedero o para evaluar cualitativamente si la resistencia al corte de los residuos cambia con el tiempo.

Otro de los ensayos muy empleado es el de carga en rellenos sanitarios. Varias investigaciones muestran experiencias de ensayos con placas convencionales de diferentes diámetro y ensayos de carga de grandes dimensiones. La heterogeneidad de los residuos y su deformabilidad aconsejan realizar ensayos con placas de grandes dimensiones y mediciones de asiento prolongadas. Se recomienda una vez efectuado el ensayo, excavar calicatas para determinar algunos datos que tienden a no ser constantes como la composición de los residuos, espesor y tipo de suelo de cobertura, etc.

En el seguimiento geotécnico realizado por la Universidad de Cantabria en el relleno sanitario de Meruelo (Sánchez et al 1991), se efectuaron ensayos sobre placa circular de 45 cm. de diámetro, considerándose que con deformaciones del orden de 45 mm se alcanzaba la rotura. El valor medio de la carga de hundimiento fue de 2,00 kg/cm<sup>2</sup>, para 30 cm. de espesor de cobertura. Con la hipótesis de que la forma de rotura fue

por punzonamiento de la capa superior resistente, la resistencia al corte sin drenaje calculada corresponde a un valor de  $0,3 \text{ Kg/cm}^2$  (análisis  $\phi = 0$ ).

En la investigación efectuada en Benopolis, Brasil (Souza y Rodríguez, 1980) se realizaron ensayos de placa de carga con distintos espesores de cobertura, encontrándose un valor de  $0,9 \text{ Kg/cm}^2$  para un espesor de cobertura de 25 cm y deformaciones de 25 mm.

La investigación en el relleno sanitario de Benopolis, también se estudió el comportamiento de una edificación experimental de  $30 \text{ m}^2$  de superficie, cimentada sobre una solera de hormigón armado de 0,07 m de espesor. La presión máxima sobre el terreno en las zonas de paredes fue de  $0,65 \text{ Kg/cm}^2$  y la presión mínima en la zona central de la planta fue de  $0,2 \text{ Kg/cm}^2$ . En las mediciones efectuadas se registraron asientos de 8 cm. en 120 días y no se observaron grietas de importancia por efecto de asientos diferenciales.

En el relleno sanitario de Limache, la U. Católica de Valparaíso realizó a partir de 1990 el seguimiento del comportamiento de un vivienda experimental de  $16 \text{ m}^2$  de superficie, construida sobre un sector del vertedero de 6 años de antigüedad, siendo el espesor del relleno de 6 m. La edificación es de albañilería reforzada, con cimentación continua de hormigón armado, arrojada con escuadras de refuerzos; las cargas transmitidas al terreno están entre  $0,10 \text{ kg/cm}^2$  y  $0,60 \text{ kg/cm}^2$ . Los resultados preliminares mostraron un adecuado comportamiento estructural, con deformaciones asimilables por la construcción.

En la actualidad la dificultad para encontrar emplazamientos de rellenos sanitarios se está superando con la ejecución de vertederos de gran altura, los que pueden ser construidos sobre uno ya existente o sobre un terreno apto. Entre los vertederos en altura se deben distinguir aquellos en pendiente como los emplazados en quebradas y los de altura, propiamente dichos, construidos sobre terrenos planos o sobre un vertedero existente. Con el propósito de evitar problemas geotécnicos durante la fase de explotación y clausura, es necesario estudiar los aspectos geotécnicos relacionados con la **estabilidad de taludes**. Sin embargo, esta preocupación adquiere más fuerza cuando se trata del período de postclausura durante el cual no se tienen los resguardos de seguridad que existen en la etapa de explotación, en la que siempre hay una entidad responsable de dichos resguardos.

En el interior de la masa de residuos de estos vertederos, se pueden originar planos de rotura activos que alcanzan un desplazamiento progresivo. Los deslizamientos en estos rellenos generan fisuraciones y agrietamientos externos que dejan los residuos descubiertos y facilitan la introducción de agua superficiales que generan un incremento del desplazamiento, disminuyendo progresivamente la estabilidad. En algunos casos, se han producido deslizamientos causados por el peso propio, debido a que aunque el material de relleno es liviano en sí mismo, el suelo de cobertura y de las paredes de las celdas son más pesados.

Los deslizamientos más comunes presentan superficie de rotura aproximadamente circular. En vertederos en altura se dan dos mecanismos con este tipo de rotura circular. Cuando el relleno de residuos sólidos es inestable, el deslizamiento ocurre en el talud del vertedero, con círculos de rotura que pueden ser superficiales de pie o de talud. Cuando el vertedero tiene altura excesiva y está cimentado sobre arcillas blandas, se puede producir una rotura general del suelo blando de cimentación causando una superficie de rotura de círculo profundo. De lo anterior se desprende que las causas de los deslizamientos en vertederos son diversas.

La estabilidad de los taludes en los rellenos sanitarios es evaluada generalmente por procedimientos geotécnicos convencionales, referencias sobre este tema han sido publicadas en congresos y textos sobre geotecnia ambiental. Los valores medios para taludes de rellenos sanitarios están entre 2-3:1 (H:V). La mayor dificultad que presenta el análisis de la estabilidad de estos taludes, con superficies potencialmente deslizantes, es la selección de los parámetros resistentes a emplear en los métodos tradicionales de cálculo.

Una vía para la obtención de los parámetros de diseño, adicional a los ensayos de laboratorio y de terreno es realizar cálculos "a posteriori" (Back-analysis) a partir de campos de prueba y registros operacionales. La figura 2 muestra un resumen de parámetros resistentes obtenidos por diferentes vías y autores.

**FIGURA 2.** Parámetros resistentes en rellenos sanitarios (Palma, 1995)  
Uno de los más recientes aportes en este tema es el presentado por Hirata, T et al.(1995), los dan a conocer una clasificación en cuatro grupos, de diferentes tipos de

residuos en rellenos y su relación con propiedades mecánicas y condiciones de recuperación o saneamiento de vertederos.

Algunos autores como Singh y Murphy (1990) cuestionan la utilización de los principios de la Mecánica de Suelos para la evaluación de la resistencia y estabilidad de los residuos sólidos. Argumentan en primer lugar, que la teoría de Mohr-Coulomb puede no ser adecuada teniendo en cuenta que los residuos sufren grandes deformaciones sin llegar a rotura. En segundo lugar, la incompatibilidad de esfuerzos con deformación que produce rotura por corte en suelos y aquellos que producen rotura por corte en residuos, indica que los análisis de estabilidad de un relleno de residuos sólidos puede estar relacionada más con sus asientos y capacidad de soporte de la cimentación que con la rotura de talud.

#### **EXPERIENCIAS CHILENAS EN REHABILITACIÓN DE VERTEDEROS O RELLENOS SANITARIOS.**

La alternativa de dar un destino para la construcción a los rellenos sanitarios, se puede consignar como una de las más utilizadas, sobre todo en países desarrollados donde antiguas zonas de vertido han quedado inmersas dentro del radio urbano. Existen variados casos, que han sido divulgados en la literatura especializada, sobre la cimentación de diversas estructuras en antiguos vertederos o rellenos sanitarios.

Para el uso posterior de un antiguo vertedero sanitario, el manejo de gases y líquidos lixiviados, junto con los aspectos geotécnicos, son los principales problemas a resolver antes de decidir el uso comercial que se dará al terreno. Dependiendo del tipo de estructura que se requiera emplazar sobre el relleno de residuos sólidos, las soluciones que se han empleado en el mundo para resolver los problemas derivados de los asientos y la capacidad de soporte del relleno han sido variadas. Entre las soluciones que se han utilizado podemos mencionar:

- La remoción de parte o la totalidad de los residuos del antiguo vertedero y su reemplazo por material de mejor calidad, que se dispone en condiciones controladas y sobre el cual se cimienta la estructura.
- El mejoramiento del relleno de residuos sólidos, recurriendo a prácticas de estabilización geotécnicas como la compactación del relleno, la consolidación dinámica, la precarga u otros.
- La cimentación profunda mediante pilotes
- La disposición de una capa de sellado superficial, de suelo de buena calidad, debidamente compactado y sobre la cual se emplaza la estructura.

Entre las estructuras de uso comercial que se han emplazado sobre antiguos vertederos podemos mencionar, las de tipo vial como estacionamientos y vías de comunicación y las de tipo edificacional como galpones y edificios de todo tipo. En estos casos, el grado de asentamiento que se puede alcanzar, es un parámetro que

reviste gran importancia en comparación con las otras alternativas de utilización posterior de rellenos sanitarios.

En soluciones como calles o estacionamientos, los asentamientos pueden producir agrietamientos que dañan la superficie del pavimento, además de facilitar el ingreso de agua de escorrentía superficial al interior del relleno, afectando la base del pavimento y aumentando la generación de biogas y líquidos lixiviados. En este tipo de emplazamientos, si el recubrimiento y los residuos están bien compactados, es posible que el recubrimiento final de sellado sea menor. También es recomendable optar por pavimentos de tipo flexible, por su capacidad de adaptarse a los asentamientos superficiales del relleno.

La construcción sobre antiguos rellenos sanitarios exige que se consideren las restricciones geotécnicas y medioambientales que impone este tipo de terreno. Cuando se registren migraciones de biogas hacia edificios emplazados en el área ocupada por el relleno, será necesario instalar un sistema de ventilación de gas bajo el edificio. Cuando ocurran migraciones fuera del relleno, el sistema de ventilación se debe instalar en el perímetro del relleno con el objetivo de controlar la migración del biogas, tal como se ha hecho en los grandes vertederos de Santiago durante los últimos años.

Con respecto a rehabilitación de vertederos, la situación en Chile hasta hace poco tiempo no presentaba los niveles de desarrollo conocidos para otras etapas del manejo integral. Entre las primeras preocupaciones por investigar el tema, se tienen los trabajos presentados por la U.C.V. en los Congresos de Ingeniería Sanitaria de Viña del Mar y Temuco (Oyarzún, A. Et al., 1979) y (Espinace R., 1983) y luego entre 1987 y 1991 la investigación financiada por FONDECYT, donde se abordaba el problema de la construcción sobre estos rellenos y se proponen parámetros y modelos de cálculo. Además se desarrollan experiencias piloto de rehabilitación de rellenos sanitarios en proceso de cierre, las que fueron posteriormente aplicadas en conjunto con otros países, principalmente España, a casos reales a través de convenios bilaterales.

Con relación a las experiencias de reinserción de carácter natural que se han realizado en Chile y que no han contado con proyectos específicos, algunas de las cuales se mencionan en el estudio en ejecución realizado en el marco del Proyecto Conama/BIRF, "Diseño de un Plan de Cierre y Rehabilitación de Areas Utilizadas como Vertederos o Rellenos Sanitarios" realizado por la U.C.V. se puede decir que existen varios casos donde se ha empleado sitios ocupados por antiguos vertederos, sin que haya existido un estudio riguroso previo ni menos un programa de reinserción. Ya el año 1982 en el 2º Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, se citaba el problema de fallas catastróficas en algunos grupos habitacionales de Santiago por asientos diferenciales de fundaciones apoyadas sobre basurales no detectados por exploraciones mal o no realizadas. En el VIII Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria realizado en La Serena, se planteó (Fajardo M., 1989), que en algunas comunas de nuestro país se ha permitido edificar sobre terrenos que fueron rellenados con basuras, produciéndose con posterioridad, graves y variados

deterioros en sus estructuras, interiores y redes de servicios. En dicha publicación, se estudió el caso de un conjunto habitacional en Santiago determinándose que el 30% de las viviendas presentaban deterioros graves y sólo el 36% no presentaban deterioros visibles; se estudiaron las causas que provocaron los daños de las construcciones basado en estudios de Mecánica de Suelos y se hacía un análisis de las disposiciones que deberían cumplirse para edificar eventualmente sobre rellenos. Una conclusión allí planteada que es coincidente con una iniciativa propuesta por la U.C.V. al Ministerio de la Vivienda y Urbanismo en la misma época es la necesidad de que las municipalidades del país dispongan de un catastro de todos los terrenos del tipo de relleno artificial y que en los respectivos planes reguladores sean asignados para zonas compatibles sólo con el uso que a ellos se puede dar. Casos similares se han detectado en otras partes del país como en Valparaíso, donde al construirse la población La Explanada en el sector de Playa Ancha, se descubrió que una parte del emplazamiento de varios edificios, se situaba sobre un antiguo vertedero de la ciudad. En este caso se teme que a pesar de los esfuerzos que se materializaron en una modificación del proyecto, algunas de las construcciones del sector han quedado sobre antiguos rellenos.

Información preliminar recogida por estos autores, con relación al destino que se habría dado a los sitios ocupados por los antiguos vertederos de Santiago de los años sesenta, indica que en el vertedero de La Florida, se habrían construido poblaciones tanto en sus alrededores como sobre éste, existiendo antecedentes de asientos tanto de pavimentos, como de viviendas. En el antiguo vertedero La Montaña, actualmente la zona está parcelada para la construcción de futuras instalaciones de carácter industrial. El antiguo vertedero de Macul, actualmente se encuentra ocupado por algunas construcciones livianas y en gran parte de él se construye un gran parque de atracciones el que cuenta parcialmente con fundaciones en base a pilotes.

Casos con una mayor planificación, o de un uso más racional del suelo son a modo de ejemplo los del antiguo relleno Intercomunal La Reina, en Santiago y el antiguo relleno de la ciudad de Curicó. En el primero que funcionó hasta aproximadamente 1970 y fue sometido a cierre en 1977, se habilitó parte de lo que actualmente es el **Parque Intercomunal La Reina**, existiendo actualmente sobre él, canchas de fútbol, caminos de tierra, estacionamientos y plantaciones principalmente del tipo arbóreas. En el vertedero de **Curicó**, que recibió las basuras de esta ciudad y de Molina entre los años 1960 a 1986, se ha materializado parcialmente por parte de la Municipalidad, la construcción del Parque Santa Fe.

Sin lugar a dudas, las experiencias chilenas que han contado con una mayor profundidad en cuanto a proyecto de ingeniería y aplicaciones geotécnicas son las efectuadas para la reinserción de los antiguos vertederos **La FERIA, La Castrina y La Cañamera**, realizados entre 1993 y 1997. Estas experiencias han contado con una planificación previa, con proyectos de inversión y de ingeniería y han sido realizadas dentro de un programa marco, específicamente el Programa de Parques del Ministerio de la Vivienda. Su unidad ejecutora ha sido el SERVIU Metropolitano y el objetivo principal definido es generar un plan de acción destinado a realizar el

cierre y inserción a parque de antiguos depósitos de basura emplazados en áreas que actualmente se encuentran rodeadas de núcleos urbanos, sustentado en un manejo ambientalmente adecuado de la superficie afectada.

La Cañamera, fue uno de los siete lugares para la disposición final de los residuos sólidos domiciliarios con el que contaban las 17 comunas que componían el Área Metropolitana de Santiago a fines de la década de los sesenta y comienzos de los setenta. Su explotación se inició el año 1962, siendo clausurado en diferentes oportunidades. Por su parte el vertedero **La Castrina** ubicado en la zona suroriente de Santiago, fue durante los años setenta, un sitio para la disposición final de residuos más que nada del tipo inerte y fundamentalmente de escombros. En él se depositaron gran parte de los escombros derivados de un tramo importante de la construcción del ferrocarril metropolitano de Santiago. Este vertedero ya fue reinsertado y transformado a parque, dentro del mismo programa ya señalado del MINVU. Todas estas experiencias tienen en común que fueron inicialmente pozos de extracción de áridos que una vez agotados, se emplearon como sitios destinados a la disposición final de residuos sólidos.

El relleno sanitario **Lo Errazuriz** de aproximadamente 40 Há, comenzó su operación en 1984 y la concluyó en 1995 con abiertas dificultades por encontrarse su vida útil acabada y haber tenido que culminar su operación con sobrecargas que ocasionaron un importante impacto medioambiental y geotécnico. Al finalizar su operación se contaba con 10 Há convertidas en áreas verdes, más el proyecto de un parque de 3 Há y un monitoreo de control ambiental. El cierre se ha hecho colocando sobre la última capa de cobertura de 25 cms. de espesor, tres capas de suelo arcilloso compactado de 20 cm. cada una, de permeabilidad 10-4 cm/seg. Sobre ella va un polietileno de alta resistencia y sobre éste otra capa de 40 cm. de limo y tierra vegetal, para finalizar con una capa de 5 cm. de tierra de hojas. Todo el terreno cuenta con pendientes entre un 2% a 5% hacia los extremos del área, para permitir el escurrimiento superficial de aguas lluvias. Esta solución, si bien es buena para los fines propuestos, es de un costo aún elevado para la mayoría de la realidad chilena.

Por su parte, el relleno sanitario **La Feria**, es uno de los mejores ejemplos, tanto a nivel nacional como iberoamericano, de sellado y inserción de grandes rellenos sanitarios abandonados, ya que a diferencia de los citados anteriormente, este vertedero fue quien recibió la mayoría de los residuos sólidos de la ciudad de Santiago. Estuvo en operación activa entre abril de 1977 y agosto de 1984 y fue abandonado a fines de los años ochenta. El área primitivamente se usaba como una zona de reserva urbana, para luego convertirse en un pozo de explotación de áridos que alcanzó una longitud de aproximadamente 800 x 400 m. y una profundidad media de 20 metros. Desde su clausura hasta el año 1993, el relleno sanitario en abierta situación de abandono, se constituyó en una zona ubicada en el centro de un área poblacional, generando un impacto negativo, debido principalmente a su condición de lugar clandestino de acopio de residuos, foco de insalubridad y centro de acciones delictuales.

El SERVIU Metropolitano, desarrolló a partir de 1993, el proyecto de sellado y reinserción a parque. Actualmente, el proyecto de reinserción en su primera etapa ha concluido dando paso a un gran parque de 11,7 Há, el que ha sido denominado Parque André Jarlan. Además, se ha construido la continuación de la Avda. Salesianos sobre el vertedero, generándose una importante conexión vial. En esta obra se han presentado importantes asientos a pesar de su antigüedad, los que superan el 30%. Estos han obligado a constantes reparaciones que deberán continuar mientras no se produzca la estabilización de los asientos.

En todos estos antiguos vertederos donde se han realizado proyectos de reinserción después de varios años de abandono de los rellenos, la participación geotécnica ha consistido principalmente en el reconocimiento del subsuelo generalmente mediante calicatas y ensayos C.P.T.; la caracterización de los materiales a través de ensayos de laboratorio; la estimación de la deformabilidad principalmente aplicando los modelos de Sowers, Cartier y Baldit; el análisis de la estabilidad de taludes en los casos necesarios.

#### **COMENTARIOS FINALES**

Durante los últimos años se ha observado como la Geotecnia Ambiental ha tenido una creciente participación en los proyectos de rellenos sanitarios. En nuestro país se ha destacado en este artículo, su quehacer en la rehabilitación de antiguos vertederos y en decisiones durante la operación de vertederos en uso. También ha tenido una activa participación en la etapa de elección del emplazamiento, como es el caso del nuevo relleno sanitario de Santiago, ubicado en Til-Til.

Es claro que en los próximos años esta participación irá en aumento, sobretodo considerando los resguardos técnicos y medioambientales que se requerirán a futuro. Ello obligará a acentuar los conocimientos y la investigación en los diversos temas que han sido abordados en este artículo.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores manifiestan su agradecimiento al proyecto CONAMA/BIRF "Desarrollo de instituciones del medio ambiente" y al SERVIU Metropolitano por la colaboración prestada a las investigaciones realizadas sobre rehabilitación de vertederos sanitarios. También desean expresar su reconocimiento a la Dirección General de Investigación y Postgrado de la Universidad Católica de Valparaíso por el apoyo prestado.

## REFERENCIAS

Arias, A., (1994), "Modelo de Asentamiento de Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos". Tesina de Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental D.C.T.A. y M.A., Universidad de Cantabria, España.

Bookter, T. y Ham R., (1982), Stabilization of solid waste in landfills, ASCE, Dic.  
Cartier, G., y Baldit, R., (1983), "Comportement Géotechnique des Décharges de Residus Urbains". Bull. Liaison, Lab. Central des Ponts et Chaussées, 128, Nov-Dec, pp. 55-64.

Espinace, R., (1983) "Compresibilidad de Vertederos Sanitarios" y "El Vertedero Sanitario y su Empleo como Suelo de Fundación", V Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y del Ambiente, celebrado en Temuco.

Espinace, R. et al. (1989) "Recuperación de Vertederos Sanitarios. Caso Vertedero Experimental de Limache. Chile". 1º Congreso de Ingeniería Ambiental Bilbao, España.

Espinace, R., Palma J., (1990) "Problemas Geotécnicos de los Rellenos Sanitarios", Revista Ingeniería Civil del CEDEX, Nº77, Edición Octubre, Noviembre y Diciembre de 1990, Madrid, España..

Espinace, R. Díaz, I., Palma J., (1991) "Propiedades Mecánicas del Relleno Sanitario de Limache". IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Viña del Mar.

Fajardo, M., (1989), "Edificación en rellenos artificiales formados por basuras". VIII Congreso chileno de ingeniería sanitaria y ambiental. La Serena, Chile.

Gandolla, M., Dugnani, L., Bressi, G., y Acaia, C., (1992), "The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites". Proc. Int. Solid Waste Association Conference. pp. 1-17 (sin paginar), Madrid, Junio.

German Geotechnical Society for ISSMFE., (1991), "Geotechnics of Landfills and Contaminated Land Technical Recommendations GLC". Ernest y Sohn, Berlín.

Hinkle, R.D., (1990), "Landfill site reclaimed for commercial use as container storage facility". Geotechnics of Waste fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp. 331-344.

Hirata, T., Hanashima M., Matsufuji, Y., Yanase, R., and Maeno Y., (1995), "Construction of facilities on the closed landfills". Sardinia 95. Fifth International Landfill Symposium, (1995), editorial CISA, Italia.

Landva, A.O., y Clark, J.I., (1990), "Geotechnics of waste fill". Geotechnics of Waste fills -Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp. 86-103.

Oyarzún, A., y Rojas, L., (1979), "El Relleno Sanitario y la Posibilidad de Recuperación y Utilización de un Suelo". Síntesis para optar al título de Constructor Civil, Universidad Católica de Valparaíso, Chile, octubre.

Palma J.H. (1995). "Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos". Tesis doctoral, U. de Cantabria, Santander, España.

Rao, S.K., Moulton, L.K., Seals, R.K., (1977), "Settlement of refuse landfills". Proc. Conf. on Geotechnical practice for disposal of solid waste materials, U. of Michigan, ASCE, pp. 574-598.

Sánchez Alciturri, J.M., Palma, J.H., Sagaseta, y C., Cañizal, J., (1991), "Aspectos geotécnicos del vertedero sanitario controlado de Meruelo". Revista técnica del Medio Ambiente, 25 Nov.-Dic., pp. 101-108.

Souza, O., y Rodríguez, M., (1980), "Aterro Sanitário Aspectos estruturais e ambientais". Boletín de la Asociación Brasileña de limpieza pública, pp. 7-94.

Sowers, G.F., (1968), "Foundation Problems in Sanitary Landfills". Journal of the sanitary division, ASCE, vol. 94, N° SA1, pp. 103-116.

Sowers, G.F., (1973), "Settlement of waste disposal Fills". 8a Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineerings, vol. 2, Moscú, pp. 207-210.

Zimmerman, R.E., Chen, W.H., Franklin, A.G., (1977), "Mathematical Model for Solid Waste Settlement". Proc. Conf. on Geotechnical practice for disposal of solid waste materials. Univ. of Michigan, ASCE pp. 210-226.