



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN  
GRUPO DE GEOTECNIA**



# **GEOTECNIA AMBIENTAL EN RELLENOS SANITARIOS**

**Raúl Espinace A.**

**Noviembre 2003**



## **GEOLÓGIA AMBIENTAL**



**“ Conjunto de técnicas , métodos y conocimientos geológicos aplicados, destinados a dar respuesta a la gestión responsable de los recursos naturales, protección del medio ambiente y uso racional del territorio “  
(INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO DE ESPAÑA)**

**“ La Geología Ambiental constituye la culminación de un proceso que comienza estudiando y aplicando aisladamente temas de distintas ciencias, hasta reconocer la necesidad de un enfoque polivalente, que permita planificar con acierto el uso del territorio “**





## RIESGOS GEOLÓGICOS



- **ASOCIADOS A LA GEODINÁMICA EXTERNA :**  
Desprendimientos, deslizamientos, inundaciones, aluviones, hundimientos, etc.
- **ASOCIADOS A LA GEODINÁMICA INTERNA :**  
Volcanes, terremotos, etc.
- **ASOCIADOS A LA ACCIÓN DEL HOMBRE :**  
Explotación y uso indiscriminado de los recursos naturales, generación de grandes cantidades de residuos.



## GEOTECNIA AMBIENTAL



### GEOTECNIA :

Técnica con elementos de ciencia y " arte " que se dedica al estudio de las propiedades de suelos, rocas y materiales artificiales, así como a la resolución de problemas de fundaciones y/o excavaciones en ellos o a su empleo como material de construcción (presas, terraplenes, vías de comunicación, etc).

### GEOTECNIA AMBIENTAL :

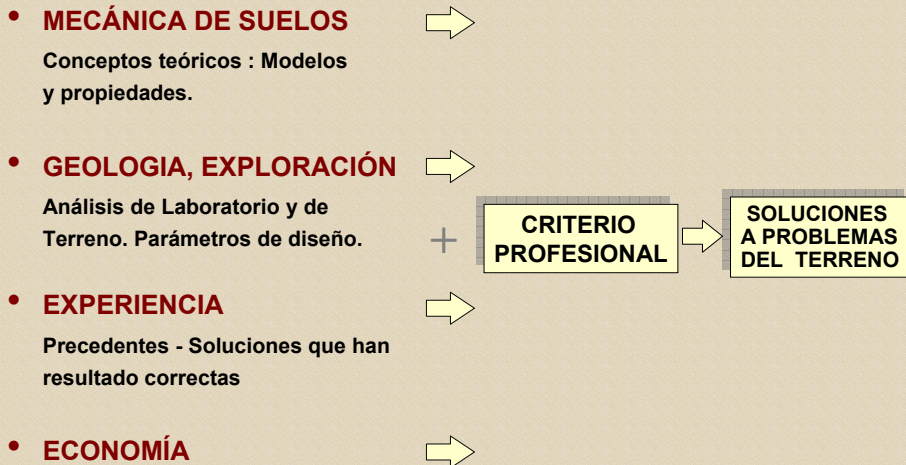
Actividad técnica destinada a resolver diferentes problemas originados por las variaciones de las condiciones ambientales, que se presentan en los suelos en condiciones naturales o artificiales.

Es el punto de encuentro entre la geotecnia clásica y las ciencias ambientales que se produce cuando se atienden cuestiones en las que por el propio material o por el método de solucionar el problema, es preciso el concurso de la Geotecnia, o cuando se trata de aspectos geotécnicos en los cuales las acciones son del tipo ambiental.





## PROCESO DE RESOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS DE GEOTECNIA AMBIENTAL



## ACTIVIDADES DE LA GEOTECNIA AMBIENTAL



- **Erosión de las laderas naturales por flujos de aguas, precipitaciones, influencia de variaciones térmicas, acciones eólicas, etc.**
- **Erosión o inestabilidad de taludes de cortes ejecutados sobre laderas naturales**
- **Erosión de materiales pétreos empleados en recubrimientos por cambios ambientales como viento, humedad, etc.**





## ACTIVIDADES DE LA GEOTECNIA AMBIENTAL



- Problemas de estabilidad de depósitos de residuos mineros.
- Estudio de propiedades geotécnicas de residuos mineros y su utilización en presas como las de relaves.
- Aprovechamiento de cenizas volantes o escorias como materia prima de caminos, terraplenes o rellenos.



## ACTIVIDADES DE LA GEOTECNIA AMBIENTAL



- Diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios.
- Utilización de rellenos sanitarios como apoyo de estructuras livianas.
- Trabajo interdisciplinario para la solución y planificación de temas medio ambientales.
- Evaluación de la contaminación del suelo por metales pesado y los riesgos asociados.





## LA GEOTECNIA EN LOS RELLENOS SANITARIOS



### ETAPAS DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS

- Producción
- Almacenamiento
- Recolección
- Transferencia
- Transporte
- Procesado
- Disposición final
- Cierre y abandono



## EL RELLENO SANITARIO



- Es una obra de ingeniería, en la que se emplean técnicas y maquinaria de movimiento de tierras para construir rellenos artificiales.
- Las características y heterogeneidad de estos residuos, influyen en el comportamiento geotécnico de estos rellenos.





## **ETAPAS DE UN RELLENO SANITARIO**



### **SELECCION DEL EMPLAZAMIENTO**

Los sitios deben ser diseñados y manejados de tal manera, que las sustancias nocivas no alcancen la biósfera e hidrósfera, en cantidades inaceptables (de acuerdo con regulaciones nacionales apropiadas), además de impedir que se produzca una afección no deseada o inaceptable sobre la salud humana y el medio ambiente.



## **ETAPAS DE UN RELLENO SANITARIO**



### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN OBRAS DE PARTIDA:**

Pretiles, drenes, sellos, otros.





## **ETAPAS DE UN RELLENO SANITARIO**



### **OPERACIÓN**

Compactación, taludes, coberturas, etc.



## **ETAPAS DE UN RELLENO SANITARIO**



### **CIERRE:**

Operación que da por finalizada la explotación (clausura del lugar; faenas de desmantelamiento, limpieza y colocación de capa de cobertura final).

### **SELLADO:**

Operación posterior al cierre donde se construyen las obras para mantener los residuos aislados, minimizando riesgos de contaminación y peligro sanitario. También se consideran las obras destinadas al monitoreo.



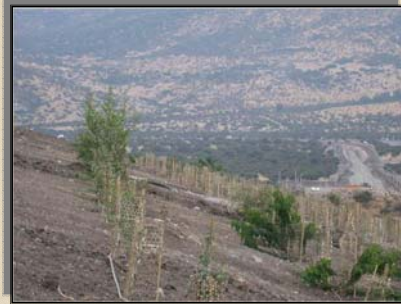


## **ETAPAS DE UN RELLENO SANITARIO**



### **REINSERCIÓN:**

Operación para reincorporar el sitio sellado a su entorno, controlando las emisiones y los problemas que puedan causar impactos negativos al ambiente y la salud. Finaliza con la implementación de las instalaciones de monitoreo, para controlar que el lugar no sea causa de contaminación de aire, suelo o agua.



## **FACTORES PARA LA SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO**



- MEDIO AMBIENTALES
- ECONÓMICOS
- POLÍTICOS
- TÉCNICOS → GEOTÉCNICOS

Calidad del subsuelo

Existencia de napas subterráneas y drenajes

Estabilidad de taludes

Existencia y calidad del suelo de cobertura







## **REQUERIMIENTOS GEOTECNICOS PARA LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO**



- Reconocimiento de la distribución de las aguas freáticas, vías de flujos y barreras (acuíferos y acuiclusos), sus propiedades hidráulicas y el efecto sellante del subsuelo.
- Reconocimiento de la composición geológica local y general
- Características morfológicas y estructura tectónica
- Análisis de riesgos de terremotos y otros peligros naturales
- Composición física y química, propiedades y secuencia de los estratos
- Distribución de los estratos, continuidad lateral y vertical.
- Comportamiento esfuerzo deformacional del subsuelo



## **REQUERIMIENTOS GEOTECNICOS PARA LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO**



**Conocimiento del régimen de las aguas freáticas:**

**El agua es el vehículo más activo en la difusión de contaminantes del terreno. Por tanto es fundamental protegerla para evitar su alteración.**

**Es preciso conocer durante las etapas iniciales del proyecto:**

- La dirección del flujo, gradiente y proporción del flujo, incluyendo fluctuaciones estacionales y de largo plazo
- La permeabilidad (horizontal y vertical) o transmisividad del estrato superficial, al agua y lixiviado.
- La distribución, espesores y profundidad de los acuíferos y acuiclusos.
- Características químicas de las aguas freáticas; datos pluviométricos; superficie de escorrentía, otras.



## **REQUERIMIENTOS GEOTECNICOS PARA LA SELECCIÓN DE EMPLAZAMIENTO**



En cuanto a la estructura y características de los macizos rocosos, los factores siguientes necesitan ser considerados:

- Tipo de roca, composición mineralógica y estratigráfica.
- Estado de descomposición y resistencia a la intemperie.
- Solubilidad en agua, lixiviados u otras soluciones agresivas.
- Extensión, grado de separación y ancho de juntas individuales.
- Tectónica y anisotropías petrográficas en la masa rocosa.
- Karstificación y riesgos de subsidencia.
- Comportamiento deformacional de la masa rocosa.
- Permeabilidad al agua, lixiviados, gases y otras soluciones agresivas.



## **REQUERIMIENTO GEOTECNICOS EN EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN**



En la etapa de diseño

- Previsiones sobre materiales a ser empleados como cobertura.
- Facilidad para su excavación y disponibilidad de préstamos.
- Calidad del suelo de cobertura y Potencial de mejoramiento del efecto sellante del subsuelo.
- Conocimiento de la capacidad portante y la deformabilidad del suelo de fundación de las obras de partida.
- Riesgo deformacional y de colapso del suelo, y fenómenos geológicos activos o reactivables.



## CONTROL GEOTÉCNICO DE LA OPERACIÓN



### **OBRAS DE PARTIDA:** Capas de sellado de rellenos sanitarios

El diseño de estas capas está ligado al impacto medioambiental admisible causado por la instalación, es decir, si tendrá un efecto importante en la calidad del agua y del suelo en sus alrededores, entre otros.

En general se pueden distinguir 4 casos en cuanto al tipo de especificaciones:

- Sin especificar
- Especificaciones prescriptivas que especifican requisitos mínimos. Ej.: 2 capas de sellado de las que al menos una es una capa sintética.
- Especificaciones que requieren que no se produzca impacto o un impacto irrelevante durante un período de tiempo determinado.
- Especificaciones que requieren un impacto mínimo a perpetuidad.



## CONTROL GEOTÉCNICO DE LA OPERACIÓN



### **OBRAS DE PARTIDA**

#### **Sellado Inicial**

Evolución de las capas de sellado:

El diseño típico consiste en capas de arcilla compactada junto a geomembranas para mejorar su eficacia. Se emplean como alternativa, capas de arcilla geosintética (geosynthetic clay liners)



También se tiende a sustituir la capa superior de suelo de filtro por otra geomalla (geonet) o geocompuesto de alta resistencia a la compresión como sistema de drenaje sobre la primera geomembrana. De esta forma se ha desarrollado un sistema de doble capa compuesta para el sellado de vertederos



## CONTROL GEOTÉCNICO DE LA OPERACIÓN



### OBRAS DE PARTIDA

### Capas de sellado inicial de arcilla

- Arcilla natural
- Capas de arcilla compactada:  
Compactación, Materiales,  
Resistencia química
- Capas geosintéticas de arcilla:  
Tipos, Propiedades, Ventajas  
y desventajas



## CONTROL GEOTÉCNICO DE LA OPERACIÓN



### OBRAS DE PARTIDA

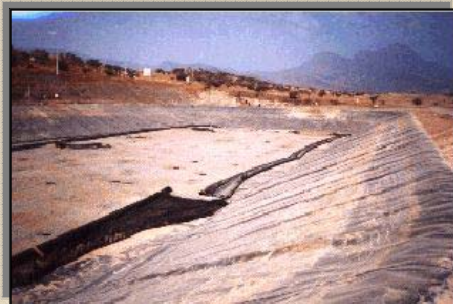
### Otras capas de sellado inicial

Capas de sellado geosintéticas.  
geomembranas:

Geomembranas rígidas o flexibles  
termoplásticas; reforzadas o no

Características:

Resistencia; Mecanismos de  
degradación: Radioactividad;  
Radiación ultravioleta.





## CONTROL GEOTÉCNICO DE LA OPERACIÓN



## REQUERIMIENTO GEOTÉCNICOS EN EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN



En la etapa de Operación y postclausura

- Control geotécnico de la operación; compactación de residuos y cobertura; calidad de materiales; comportamiento obras geotécnicas (sellos, drenes, taludes, etc.)
- 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
- Análisis de la estabilidad de taludes naturales y artificiales, particularmente en lugares de topografía accidentada, donde es necesario recurrir a diseños que cuentan con taludes importantes.





## COMPRESIBILIDAD

Los residuos sólidos depositados, sufren grandes asientos con lo cual su volumen disminuye y por lo tanto la capacidad del relleno aumenta.

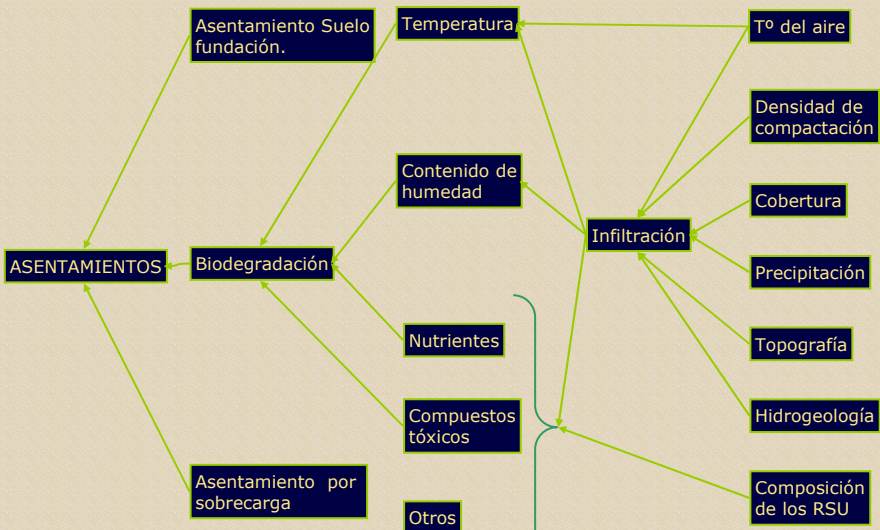
Originados por sobrecargas, asientos del suelo de fundación y biodegradación de los residuos (transformación de parte de la materia orgánica de estado sólido a líquido y luego gaseoso). La materia solubilizada deja vacíos que inducen asientos por colapso continuo.

Poder cuantificar los asientos, el tiempo y ritmo de aparición es importante para:

- Seguridad
- Aprovechamiento
- Reutilización



## COMPRESIBILIDAD



FACTORES QUE AFECTAN LA BIODEGRADACIÓN



## COMPRESIBILIDAD



La importancia de predecir los asentamientos está en poder determinar con mayor certeza su vida útil y el tiempo en el cual se podrá sellar y reinsertar el relleno después de su cierre.

### TIPOS DE MODELOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ASIENTOS

Geotécnicos Clásicos: Sowers (1973)

Leyes de Ajustes: Yen y Scanlon (1975); Gandolla et al. (1992); Rao et al (1977)

Reológicos: Zimmerman et al (1977)



## COMPRESIBILIDAD



### PLANTEAMIENTO PROPUESTO POR SOWERS (1973)

Asentamientos iniciales producidos por mecanismos mecánicos:

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

Donde:

- $S_p$  = Asentamiento 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



## COMPRESIBILIDAD



### PLANTEAMIENTO PROPUESTO POR SOWERS (1973)

Terminada la primera fase los asientos 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.

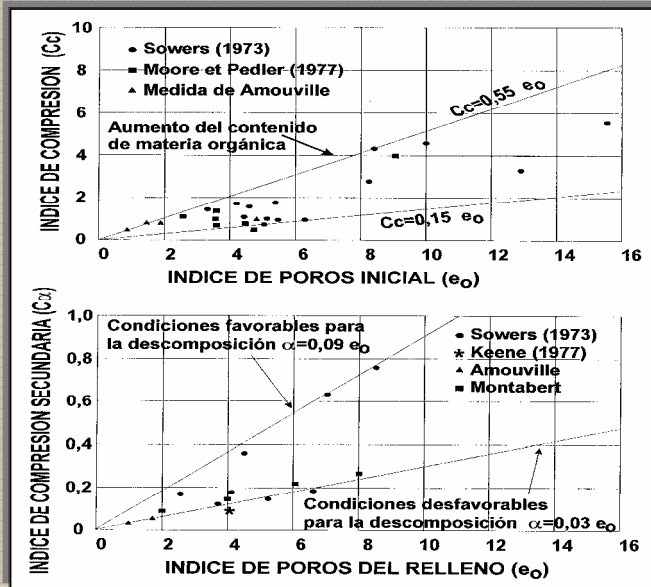
$$S_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

Donde:

- $S_s$  = Asentamiento 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 asientos
- $t_1$  = tiempo de inicio de la consolidación secundaria



## COMPRESIBILIDAD





## COMPRESIBILIDAD



### MODELO MERUELO (1994)

- Modelo básico de pérdida de masa
- Proceso aportación material



**HIDRÓLISIS**

Modelo propuesto

$$S_s = \alpha H \text{ COD} \left[ 1 - \frac{1}{k_h T_c} (e^{-k_h(t-T_c)} - e^{-k_h t}) \right]$$

**S<sub>s</sub>** = Asentamiento (mm)

**α** = Coeficiente de pérdida de masa transformada en asientos (0.15 a 0.37 en Meruelo)

**H** = Espesor del relleno (mm)

**COD** = Contenido de materia orgánica biodegradable de los residuos sólidos (tanto por uno)

**T<sub>c</sub>** = Tiempo de construcción del relleno (días)

**k<sub>h</sub>** = Coeficiente de hidrólisis (días<sup>-1</sup>) (0.003 a 0.0003 en Meruelo)

**t** = Tiempo al cual se quiere predecir los asientos (días)



## COMPRESIBILIDAD



### MODELO BÁSICO DE PÉRDIDA DE MASA

Velocidad de cambio de masa degradable

$$\frac{d(MBD)}{dt} = -k_h \cdot (MBD)$$

**MBD<sub>0</sub>** = masa biodegradable inicial (en t=0)

**t** = tiempo

**MBD<sub>t</sub>** = masa biodegradable en estado sólido al tiempo t

**k<sub>h</sub>** = constante de hidrólisis

Masa biodegradable remanente en estado sólido al tiempo t

$$MBD_t = MBD_0 \cdot e^{-k_h t}$$





## **DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA DE UN RELLENO SANITARIO**



Los factores de los que depende la resistencia de un relleno sanitario son, entre otros:

- **Espesor del sello de cobertura.**
- **Composición de los residuos.**
- **Método de Construcción del depósito.**
- **Maquinaria utilizada en la operación.**



## **DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA DE UN RELLENO SANITARIO**



### **Algunas Hipótesis:**

• **Comportamiento dúctil de los residuos al no alcanzar un valor de tensión constante.**

• **Comportamiento similar al de "tierra armada"**

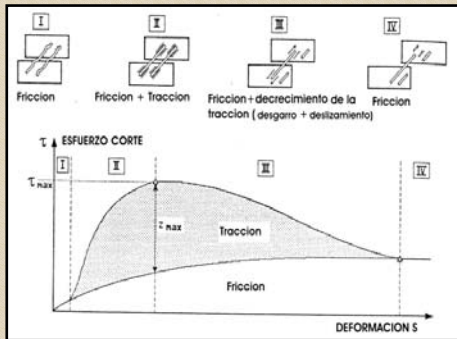
**Matriz básica: Roca interna**

**Matriz reforzada: Tracción**



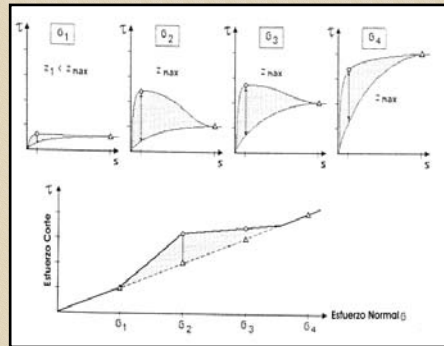


## Comportamiento de los residuos sólidos, F. Kölsch (5to. Simposio Internacional sobre Rellenos Sanitarios, Cerdeña 1995)

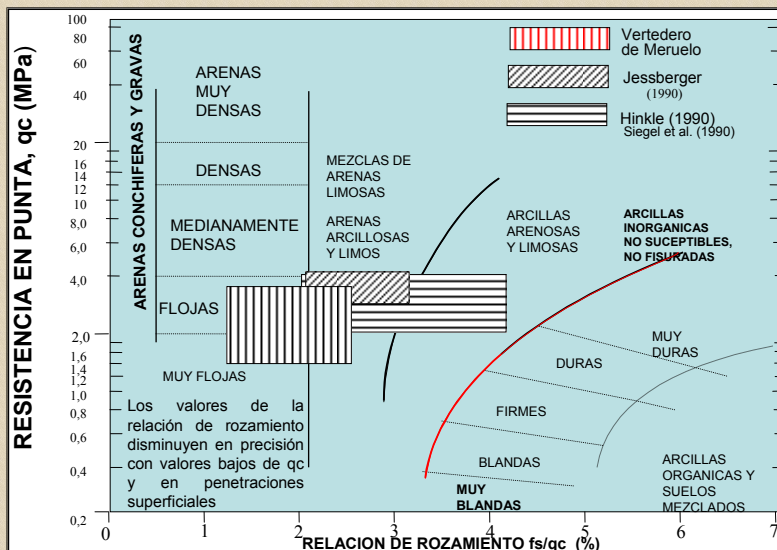


**Fig. 1: Modelo de interacción entre la fricción y la fuerza de tracción**

**Fig. 2: Modelo de incremento de la resistencia al corte por la fuerza de tracción**



## DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA DE UN RELLENO SANITARIO

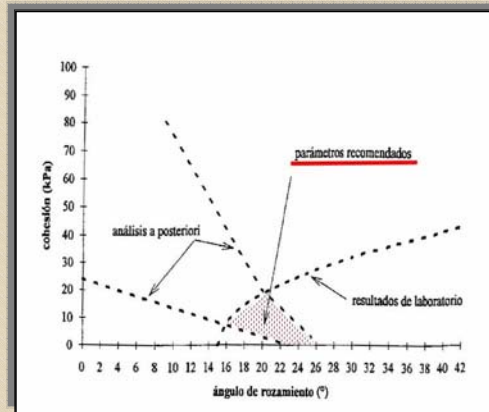




## DETERMINACIÓN DE CAPACIDAD DE CARGA DE UN RELLENO SANITARIO



Una vía para la obtención de parámetros de diseño, adicional a los ensayos de laboratorio es la realización de cálculos "a posteriori" (back-analysis) a partir de campos de prueba y registros operacionales



## ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES NATURALES Y ARTIFICIALES

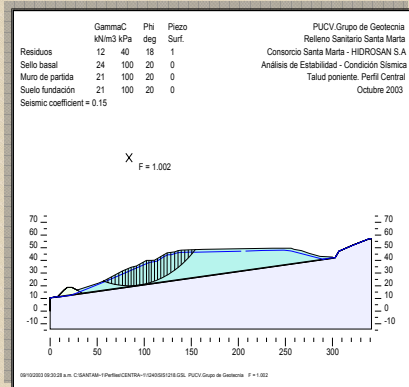




## ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES NATURALES Y ARTIFICIALES



La estabilidad de los taludes en los rellenos sanitarios es evaluada generalmente por procedimientos geotécnicos convencionales.



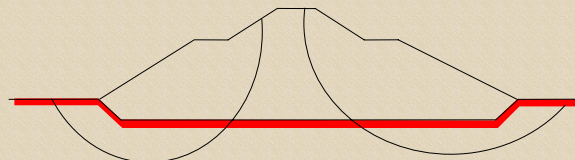
Los métodos más utilizados para la estabilización de taludes de Residuos Sólidos Urbanos son Bishop y el de desplazamientos traslacionales, en una primera fase y de talud infinito en su etapa final y clausura.



## ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES NATURALES Y ARTIFICIALES



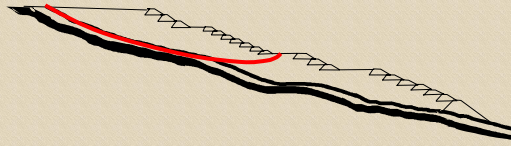
Círculos de rotura superficiales y de pie



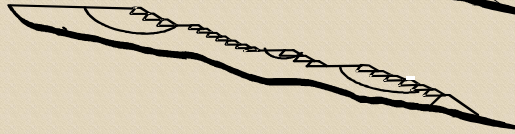
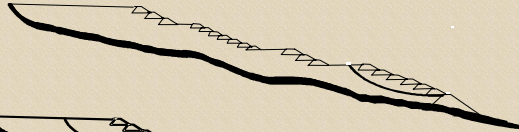
Rotura general del suelo de cimentación.



## ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES NATURALES Y ARTIFICIALES



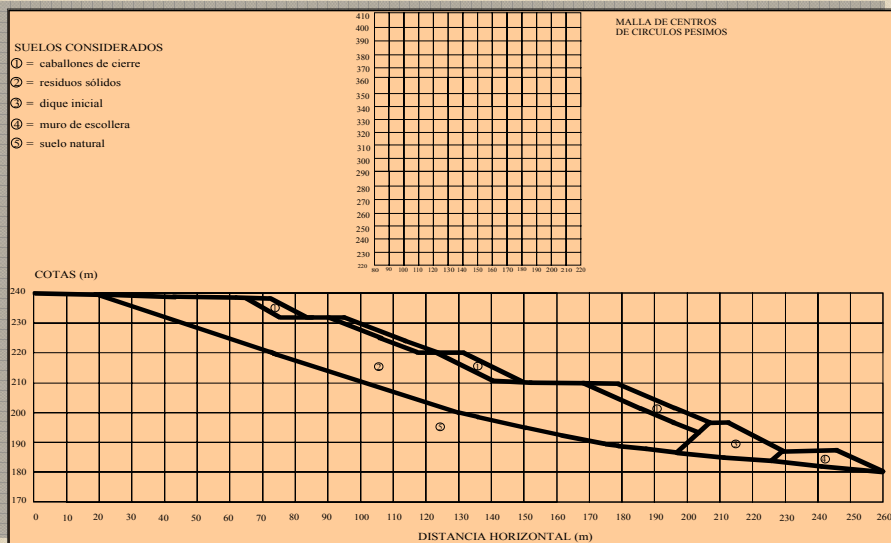
**Deslizamiento en la zona interior, sobre el sello lateral o suelo natural.**



**Círculos de rotura del piel y de pie en vertederos en pendiente.**



## **Perfil del vertedero controlado de Meruelo. Malla de tanteos.**

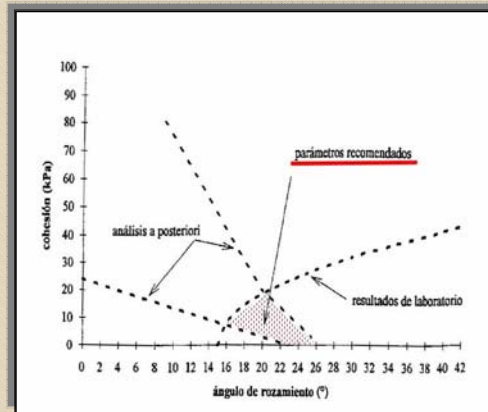




## ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES NATURALES Y ARTIFICIALES



Una vía para la obtención de parámetros de diseño, adicional a los ensayos de laboratorio es la realización de cálculos "a posteriori" (back-analysis) a partir de campos de prueba y registros operacionales



**Deslizamiento antiguo Botadero de Navarro  
13 Septiembre 2001, Cali.  
Altura 62 mt**





## **REQUERIMIENTO GEOTECNICOS EN EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN**



Técnicas para el reconocimiento geotécnico de un relleno sanitario

- Ensayos de penetración ( CPT o SPT )
- Prospección Geofísica
- Ensayos in situ como Placa de Carga
- Ensayos de Laboratorio como Edómetros de gran diámetro
- Ensayos a escala real o prototipos



## **ENSAYOS DE CAMPO:**

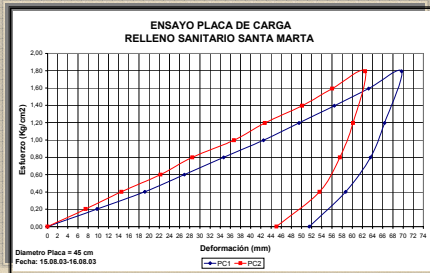


Secuencia ensayos  
Placa de Carga

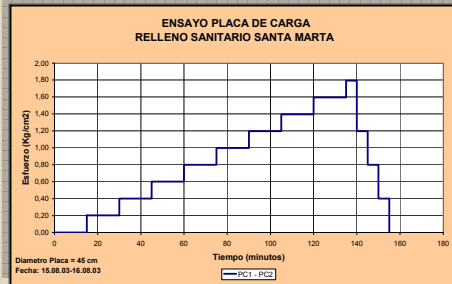




## ENSAYOS DE CAMPO:



## Análisis de resultados de los ensayos de campo



## ENSAYOS DE CAMPO:

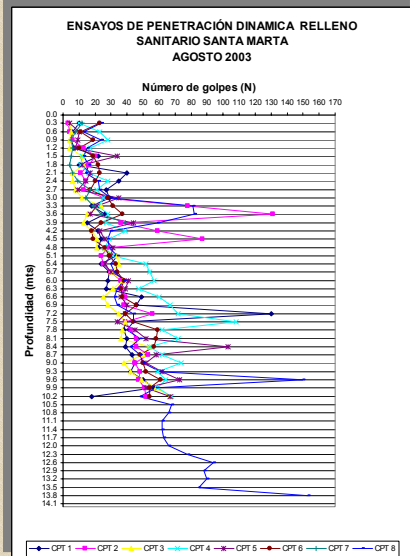


## Secuencia ensayos de penetración dinámica CPT





## ENSAYOS DE CAMPO:



## Análisis de resultados de los ensayos de campo



## ENSAYOS DE CAMPO:



## Instalación de piezómetros





## REHABILITACION DE ANTIGUOS RELLENOS DE RESIDUOS SÓLIDOS.



**Reinserción ex Relleno Sanitario La Feria, Santiago**



## ALGUNAS LINEAS ACTUALES DE INVESTIGACIÓN



- Métodos para determinar la capacidad portante de vertederos, considerando la estimación de los parámetros.
- Modelos de predicción de asentamientos en el tiempo en vertederos.
- Métodos de estabilidad de taludes en obras geotécnicas ambientales
- Estudios de alteración de los materiales de rellenos.
- Influencia de los sistemas de operación, como el manejo de lixiviados, en la estabilidad del conjunto.
- Estabilidad sísmica y efecto envejecimiento en depósitos mineros.



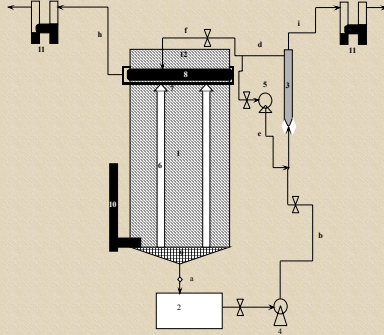
## MODELO PARA DETERMINAR EL EFECTO DE LA RECIRCULACIÓN EN LIXIVIADO EN LOS RELLENOS



Basado en una representación a escala de un relleno controlado (lisímetro) que simula el comportamiento de una celda de un relleno de residuos sólidos representativo de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar.

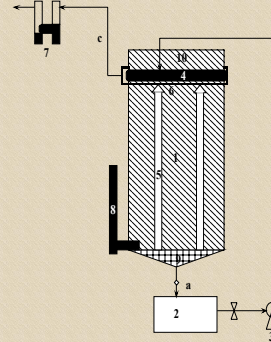
### LISÍMETRO N°1

(Recirculación de lixiviado tratado)



### LISÍMETRO N°2

(Recirculación de lixiviado sin tratar)

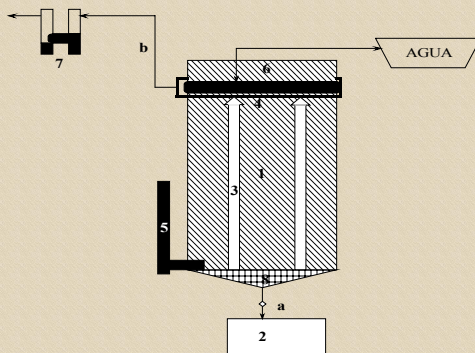


## MODELO PARA DETERMINAR EL EFECTO DE LA RECIRCULACIÓN EN LIXIVIADO EN LOS RELLENOS



### LISÍMETRO N°3

(Sin Recirculación de lixiviado)







## **PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN PUCV**



## **PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN PUCV**







## PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN PUCV



### INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL EN VERTEDERO DE LIMACHE

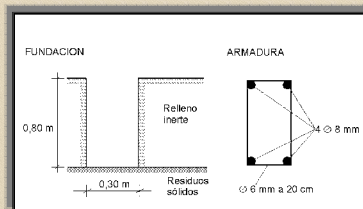
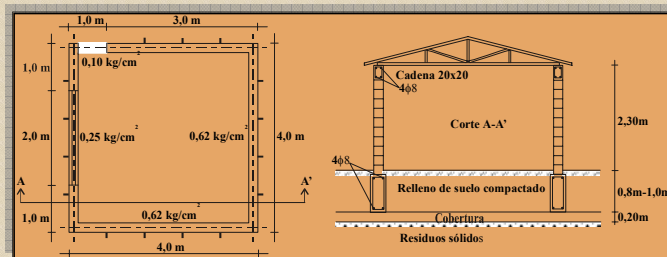
Construcción sobre la primera etapa del vertedero sanitario de Limache.



### INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL.



### CONSTRUCCIÓN SOBRE EL VERTEDERO SANITARIO DE LIMACHE.





## INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL EN VERTEDERO DE LIMACHE



## INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL EN VERTEDERO DE LIMACHE





## **METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE RELLENOS SANITARIOS**



### **OBJETIVO GENERAL**

**Desarrollo de una metodología de caracterización geotécnica que permita evaluar la estabilidad global de un relleno sanitario, a partir de la definición de sus parámetros resistentes y condiciones mecánicas.**

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- **Caracterizar geotécnicamente el relleno sanitario.**
- **Analizar la compresibilidad del relleno.**
- **Analizar la capacidad portante del relleno.**
- **Analizar la estabilidad de los taludes del relleno.**
- **Elaborar recomendaciones metodológicas, para evaluar las condiciones de estabilidad de rellenos sanitarios.**
- **Determinar la factibilidad técnica de realizar proyectos de rehabilitación.**



## RESULTADOS OBTENIDOS

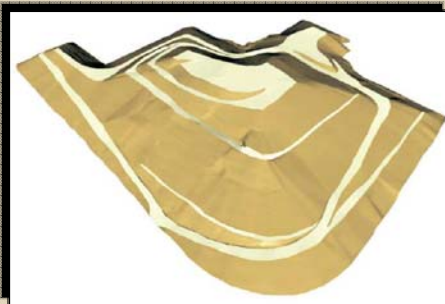


ENSAYOS DE CAMPO 1ª Etapa	CANTIDAD
<b>Sondeos de reconocimiento</b>	
Pozos de exploración (calicatas)	6
Ensayo de caracterización de R.S.U.	7
Perfilado de suelo (Barrenado)	20
<b>Ensayos de resistencia</b>	
Ensayo de Placa de Carga	6
Ensayo de penetración cono dinámico (CPT)	20
<b>Ensayo de experimentación: Lisímetros</b>	
Ensayo de caracterización de R.S.U.	10
Determinación de la humedad de R.S.U.	10
Asentamientos	M/D
<b>Piezómetros</b>	
Niveles Piezométricos	semanal
<b>ENSAYOS DE LABORATORIO</b>	
<b>Ensayos de caracterización de Suelos</b>	
Determinación de la humedad	8
Análisis granulométrico	4
Determinación de los límites de Atterberg	4
<b>Ensayos de inspección</b>	
Relaciones humedad-densidad (Proctor)	4
Determinación de la densidad in situ	10

M/D: medición diaria

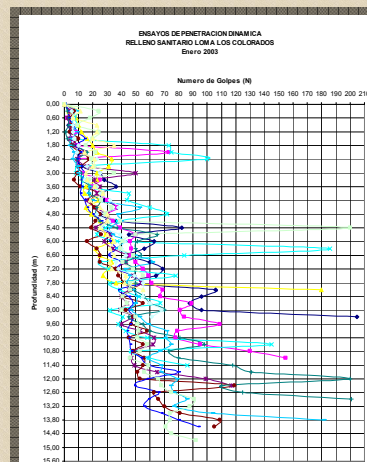


## RESULTADOS OBTENIDOS



Análisis de estabilidad de Taludes del relleno sanitario Loma Los Colorados de la Región Metropolitana.

Realización de exploración y ensayos geotécnicos in situ y laboratorio.  
Análisis de la compresibilidad del relleno



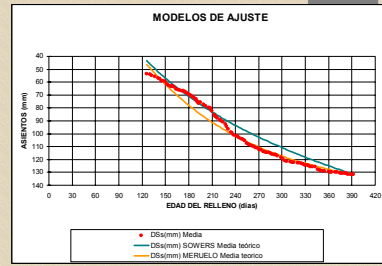


## ANÁLISIS DE LA COMPRESIBILIDAD EN LISÍMETROS CON Y SIN RECIRCULACIÓN DE LÍQUIDOS LIXIVIADOS



Los asentamientos medidos en ambos lisímetros muestran un comportamiento similar.

La predicción a 5 años bajo el modelo Sowers y Meruelo muestra un asentamiento del orden a un 12%, con una estabilización de las deformaciones.



MERUELO Predicción asentamientos para 5 años

PUNTO	H (mm)	$\alpha$	t (días)	$S_s$ (mm)	$S_s$ (%)	t	$S_s$ (mm)	$S_s$ (%)
Lisímetro N°1	2000	0.47	1825	235	12%	$\infty$	235	12%
Lisímetro N°2	2000	0.53	1825	265	13%	$\infty$	265	13%

SOWERS Predicción asentamientos para 5 años

PUNTO	H (mm)	t (días)	$S_s$ (mm)	$S_s$ (%)	$C\alpha'$
Lisímetro N°1	2000	1825	251	13%	0.089
Lisímetro N°2	2000	1825	256	13%	0.101



## ESTUDIO DEL EFECTO EÓLICO EN TRANQUES DE ARENAS DE RELAVES







## OBJETIVOS GENERALES

Crear una metodología de diagnóstico que permita determinar las variables y efectos que produce la erosión eólica en los tranques de relaves, que se encuentran en etapa de operación o abandono y generar soluciones para mitigar sus consecuencias a corto y largo plazo.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Aportar información que permita mejorar el conocimiento de los efectos de la erosión eólica en los tranques de relaves y su posible tratamiento.

Aplicar la metodología de diagnóstico en un tranque de relaves en operación del norte de Chile.

Determinar la incidencia de la erosión eólica en la estabilidad de los tranques de arenas de relaves.



## RESULTADOS

Aplicación de instrumentación que permite determinar los efectos de la erosión eólica in situ en el tranque N°3 de la Planta M. A. Matta.



Implementación Metodología de Mediciones In situ



TERMO ANEMÓMETRO DE ALETAS EXTECH  
INSTRUMENTS MEDELO 451126

Desarrollo de una metodología de medición de vientos in situ que permita tener una base de datos que permita la contrastación mediciones obtenidas por estaciones meteorológicas cercanas.





## RESULTADOS



Implementación Metodología de Mediciones In situ

**Desarrollar una experiencia piloto que permita comparar los datos de una estación meteorológica con los obtenidos en un tranque de arenas de relave.**

**Incorporación de meteorólogos que integren la información recopilada y colaboren en la interpretación y entrega de los resultados necesarios para la investigación.**



## RESULTADOS



### **METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO**

**La metodología de diagnóstico se realiza para determinar los factores más influyentes en la erosión eólica de un tranque de relaves.**

**La metodología propuesta es la siguiente:**

- **Recolección de antecedentes generales**
- **Determinación las características del tranque**
- **Determinación de efectos de erosión eólica**
- **Análisis de factores que producen la erosión**
- **Cuantificación de los efectos de la erosión.**
- **Soluciones**



## METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA VIDA ÚTIL DE UN TRANQUE DE ARENAS DE RELAVE



## OBJETIVOS

### Objetivo General.

- **Aportar una metodología que permita realizar una evaluación geotécnica en tranques de relaves de la pequeña y mediana minería, para afrontar un proyecto de ampliación de vida útil.**

### Objetivos Específicos.

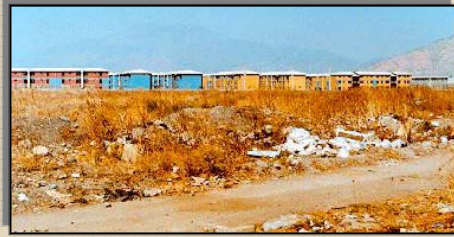
- **Evaluar durante la fase de construcción, operación y abandono por métodos simplificados, el potencial de licuefacción, la estabilidad de taludes y las deformaciones en el prisma resistente.**
- **Cuantificar la evolución de los valores de los parámetros resistentes de las arenas de relave, a partir de la obtención de nuevos valores de parámetros durante su fase de operación y/o abandono, comparándolos con los iniciales de diseño.**



## SOLUCIONES HABITUALES PARA EMPLAZAR CONSTRUCCIONES EN VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS.



- Remoción parcial o total del vertedero y su reemplazo por material de mejor calidad.



- Mejoramiento de vertederos con sistemas geotécnicos de estabilización.



## SOLUCIONES HABITUALES PARA EMPLAZAR CONSTRUCCIONES EN VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS.



### CIMENTACIÓN PROFUNDA. PILOTES

#### Problemas:

- Roce negativo y empuje lateral;
- Reposición de capa de sello de fondo (si existe se dañará por el pilotaje)
- Mantenimiento del entorno por efecto de asentamientos. Se supone que la estructura permanecerá fija en el tiempo, pero la superficie del vertedero seguirá asentándose.



### FUNDACIONES SUPERFICIALES

Esta solución es posible si prevé una vida limitada, acompañado de construcciones ligeras. La estructura tendrá que ser diseñada para soportar asentamientos diferenciales.



## SOLUCIONES HABITUALES PARA EMPLAZAR CONSTRUCCIONES EN VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS.



### Casos de construcción sobre rellenos de residuos sólidos en Chile.



**Parque André Jarlán.  
Antiguo relleno sanitario  
La Feria de Santiago.**



## PUBLICACIONES



- 1. EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN DE MODELOS PARA LA DETERMINACION DE LOS ASENTAMIENTOS DE RELLENOS SANITARIOS** (XI Congreso Panamericano de M. de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Foz do Iguazu - Brasil Agosto de 1999)
- 2. PATOLOGIAS EN CONSTRUCCIONES SOBRE AREAS IMPACTADAS POR EL VERTIDO DE RESIDUOS SÓLIDOS.** (V Congreso Iberoamericano de Patologías de Construcciones VII Congreso de Control de Calidad, Montevideo, Uruguay. Octubre 1999)
- 3. EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO DE UN VERTEDERO A ESCALA BAJO DIFERENTES MODALIDADES DE OPERACION** (V Taller y Seminario Latinoamericano "Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales", Viña del Mar, Octubre 1998)
- 4. REHABILITACION DE AREAS UTILIZADAS COMO RELLENOS SANITARIOS. EXPERIENCIAS Y PROPOSICIONES** (XII Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Copiapó, Octubre 1997)



## PUBLICACIONES



5. **EXPERIENCIAS DE REINSENCION DE VERTEDEROS MEDIANTE LA IMPLANTACION DE UNA CUBIERTA VEGETAL** (XII Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Copiapó, Octubre 1997)
6. **EVOLUCION DE LA GEOTECNIA AMBIENTAL APLICADA A LOS RELLENOS SANITARIOS** (IV Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Valparaíso, Septiembre, 1997)
7. **ASENTAMIENTOS EN UN VERTEDERO CONTROLADO A ESCALA CON RECIRCULACION DE LIQUIDOS LIXIVIADOS** (IV Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, Valparaíso, Septiembre, 1997).
8. **CLAUSURA Y REHABILITACION A PARQUE DE UN GRAN VERTEDERO SANITARIO. CASO LA FERIA DE SANTIAGO DE CHILE** (VI Congreso Iberoamericano de Residuos Sólidos, Madrid, Octubre 1996).



## PUBLICACIONES



9. **EXPERIENCIAS DE TRABAJO INTERDISCIPLINARIO EN LAS ETAPAS DE POSTCLAUSURA DE UN RELLENO SANITARIO** (XII Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Copiapó, Octubre 1997)
10. **SCALE UP OF A LANDFILL WITH RECIRCULATION OF LEACHATE TREATED WITH AN ANAEROBIC SYSTEM.**(X Symposium International IGT. Gas, Oil and Environmental Technologi. Orlando, Florida, U.S.A. December,1996)





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN  
GRUPO DE GEOTECNIA



# GEOTECNIA AMBIENTAL EN RELLENOS SANITARIOS

Raúl Espinace A.

Noviembre 2003



**Sellado:** El último diseño empleado, consistía en un sistema de impermeabilización en la base, compuesto por 2 capas de arcilla compactada cada una con 20 centímetros de espesor, una geomembrana, una capa de arena de 30 centímetros de espesor, un geotextil y finalmente 20 centímetros de suelo sobre el cual se dispone finalmente la basura. Como la zona es bastante montañosa, fue necesario llevar el sistema de impermeabilización hasta determinadas alturas sobre la ladera, esto obligó a utilizar un anclaje especial para los geotextiles y geomembranas.

**Operación:** Los residuos sólidos se disponían diariamente en celdas compactadas con altura constante de 2,5 metros, largo promedio de 51,3 metros y un frente de trabajo constante de 35 metros. Las celdas tenían un recubrimiento de 0,25 metros con material arcillo-limoso, proveniente de excavaciones en la misma área del Relleno Sanitario. El talud de cada nivel era del 33%, con terrazas de 10 m de ancho, que van cada 4 niveles a lo largo de todo el límite perimetral de cada nivel.

**Cobertura Final:** conjunto de capas compuesto por 60 cm de arcilla, mas 20 cm de grava y 40 cm de limo orgánico y finalmente forestación con vegetación nativa del área del proyecto.







Con los datos de composición física de la basura, se estimaron los parámetros de compresibilidad de la basura bajo diversas condiciones, dando los siguientes valores.



**Basura suelta (no compactada) :**  $D. seca = 0,5 t/m^3$   $e = 2,2$   $n = 0,69$

**Basura compactada:**  $D. Seca = 0,8 t/m^3$  ;  $D. Húm. = 1,0 t/m^3$  ;  $D. Sat. = 1,3 t/m^3$

El análisis de estabilidad asumió para la basura sólida un  $\phi' = 28^\circ$ ,  $c' = 2,5 t/m^2$ . Los análisis asumieron superficies de falla circulares (método de Bishop) y superficie de fallas translacionales (método de Janbu). Los diseños preliminares daban factores de seguridad entre 1,4 y 1,5.

Para el mecanismo de falla deslizante por traslación, la superficie de falla supuesta se encontró en la base del vertedero a lo largo de la interfaz entre la geomembrana y los materiales granulares de la zona de recolección del lixiviado, considerando allí un  $\phi' = 22^\circ$  para un FS calculado de 1,0.

**El proyecto tuvo como concepción principal, el suponer que el sistema de drenaje interno de líquidos y gases funcionaría perfectamente y que, las presiones intersticiales desarrolladas en los poros durante la construcción y operación del vertedero se disiparían de acuerdo con las hipótesis previstas.**



El estudio sobre la falla descubrió que **el motivo principal del deslizamiento fue que los lixiviados no pudieron ser drenados adecuadamente y por tanto se acumularon desde el comienzo de la operación, debido a que los filtros quedaron parcial o totalmente llenos.**



Razón fundamental es que existía recirculación de lixiviados funcionando ininterrumpidamente, siendo incorporados a la masa en todos los niveles de las celdas. Al no existir salida, el líquido se fue acumulando en los vacíos del vertedero, aumentando las presiones neutras. Esta acumulación contribuyó al aumento de presiones internas de gases debido a que los lixiviados dentro del relleno no permitían el flujo normal de los gases hacia la superficie y chimeneas. Las presiones de gases disminuyeron aún más la capacidad de drenaje de los lixiviados. La acumulación de lixiviados y las presiones del biogás dentro del relleno se incrementaron con el tiempo, causando disminución de los factores físicos que favorecen la estabilidad del relleno, disminuyendo las fuerzas resistentes sobre las superficies del deslizamiento y aumentando la masa y el impulso de la masa de la basura.



### Aspectos del diseño, operación y construcción que pudieron causar las excesivas "presiones de poros":

La capa de protección ubicada en la parte superior de los filtros y tuberías de fondo que contribuyó significativamente a la reducción de la capacidad de drenaje de los lixiviados;

Las capas intermedias de baja permeabilidad que contribuyeron a la deficiencia del drenaje de los lixiviados dentro del relleno;

Las concentraciones de hierro y calcio en los lixiviados que colmataron la capa de protección de los drenajes de fondo;

La falta de implementación de un sistema de extracción forzada de gases que influyó en la concentración de estos en el relleno;

Las bolsas plásticas sin romper y compactadas que pudieron afectar localmente el drenaje de los lixiviados y gases.



### Conclusiones Aplicables a otros casos:

•El diseño y operación de los rellenos sanitarios son campos de la ingeniería y la ciencia relativamente nuevos y no se ha establecido en forma definitiva los criterios y procedimientos que se deben seguir.

•Su operación es algo de mucho cuidado. No solo es colocar basura siguiendo un diseño, sino también analizar fisuras; caudales de los efluentes; análisis físicos y químicos; cantidades de basura colocadas, entre otros.

•El insuficiente desarrollo de la ingeniería práctica, exige el establecimiento de medidas preventivas durante la operación, especialmente cuando se incluye un proceso relativamente nuevo como la recirculación de lixiviados.

•Es fundamental contar con medidas preventivas y de control durante la operación del vertedero, como: piezómetros, inclinómetros y redes topográficas, para controlar los movimientos de estas masas; sistemas de control entre lixiviados producidos y recolectados que permitan determinar la acumulación de líquidos en el relleno y la factibilidad de su recirculación; elementos de presión de gases en el relleno que permitan establecer las modificaciones necesarias en el sistema de alivio. En resumen, un programa de Seguridad Geotécnica.