

## **Análisis del deslizamiento del relleno sanitario de Santa Marta, Chile.**

**D. Joan Esteban Altabella<sup>(A.1)</sup>**, Marcel Szanto Narea<sup>(B)</sup>, Francisco José Colomer Mendoza<sup>(A)</sup>, Antonio Gallardo Izquierdo<sup>(A)</sup>.

<sup>A</sup> INGRES, Ingeniería de Residuos. Depto. Ingeniería Mecánica y Construcción. Universidad Jaime I. Castellón, España.

<sup>B</sup> GRS, Gestión de Residuos Sólidos. Depto. Ingeniería de la Construcción. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso, Chile.

<sup>1</sup> [altabell@uji.es](mailto:altabell@uji.es)

## Introducción

En el mundo la capacidad de autodepuración siempre ha permitido degradar los residuos que se generan de forma natural (fracciones vegetales de zonas forestales, animales muertos, etc). Sin embargo, el crecimiento de la población mundial y su acumulación en grandes ciudades ha conllevado que la generación de residuos sólidos urbanos se incremente mucho más rápido que el tiempo necesario para su autodepuración. Ante esta situación, la disposición final de los residuos sólidos urbanos ha presentado en el tiempo una problemática que actualmente es difícil de solucionar.

El vertido de residuos sólidos sigue siendo en la actualidad el método de disposición más utilizado en la mayor parte de los países del mundo. Debido al riesgo ambiental que ello supone, países como EE.UU, la Unión Europea, el Banco Mundial, la ONU y otras entidades plurinacionales y organizaciones internacionales han elaborado en las últimas décadas una serie de pautas que deben considerarse a fin de minimizar o eliminar los impactos generados en estas instalaciones. Si bien es cierto que esta situación debiera dar seguridad, actualmente se siguen produciendo accidentes con impactos ambientales severos, y entre los más graves, los registrados en junio del año 2000 en Payatas, Filipinas (Koelsch et al. 2005); marzo del año 2003 en Atenas, Grecia (Colomer & Gallardo 2005); febrero del 2005 en Bangdung, Indonesia (Koelsch et al. 2005); agosto de 2011 Baguio, Filipinas (Moran 2011); Mayo de 2016 Zona 3, Guatemala (Press 2016); Junio de 2016 Hrybovichi, Ucrania (UNIAN 2016a) o el de enero del 2016 en Santa Marta, Chile.

La mayoría de ellos, además de los que se registran por la migración de biogás y lixiviados cuando no se impermeabiliza la superficie del vaso, son deslizamientos. Estos, de acuerdo con la teoría de la causalidad, generalmente tienen su explicación en múltiples causas y la interrelación entre ellas. Los incendios y las explosiones son algunas de las causas principales, y la formación de grietas, el aviso previo al accidente.

En este trabajo se revisan los antecedentes reportados del deslizamiento que se registró el día 15 de enero de 2016 en el relleno sanitario de Santa Marta, situado a 30 km de Santiago (Chile).

## 1. Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo se han planteado dos objetivos principales:

1. Revisar los antecedentes reportados al incidente del relleno sanitario de Santa Marte, entre otros, los informes aportados por el titular, Empresa Metropolitana de Residuos Sólidos (EMERES) y Geotecnia Ambiental.
2. Obtener un diagnóstico preliminar de la zona afectada por el deslizamiento y de las consecuencias que supuso este accidente.

## 2. Riesgos geotécnicos

Desde los años setenta y hasta la fecha, la problemática común de los principales depósitos controlados del mundo ha sido garantizar la contención sanitaria.

Dos son los grupos de factores que se han asociado a esta problemática. Por una parte, los factores internos asociados a los residuos por su heterogeneidad en cuanto a composición, humedad, temperatura y densidad, y por otra los factores externos que son los asociados a la zona en la que se depositan estos residuos, como son, la topografía y la morfología predominante. Bajo esta premisa cabe indicar que en el primer caso la descomposición de la materia orgánica genera lixiviados y biogás aumentando el riesgo de sufrir deslizamientos porque la presión intersticial de la masa de residuos se incrementa y porque el lixiviado puede acumularse en la base del vaso. En el segundo caso, cabe indicar que los depósitos controlados emplazados en laderas o vaguadas son los que entrañan mayor riesgo porque la masa de residuos generalmente se deposita sobre terrenos inclinados.

Por lo tanto, se debe considerar que aquellos depósitos que no presentan planes de operación para organizar las fases de llenado, ni instalación de sistemas de evacuación de lixiviados y captación de biogás, tienen un mayor riesgo de accidente. Los casos más habituales son los originados por una pendiente excesiva o los que se asocian a la saturación de la masa de residuos.

### 3.1 Pendiente excesiva de los taludes

Un talud con una pendiente excesiva puede generar fallos estructurales, sobre todo si además se registran episodios de lluvias intensas. Para que un talud se considere estable debe calcularse el Factor de Seguridad (FS) y para ello se deben conocer las propiedades mecánicas y físicas de los residuos que en él se depositan. Entre otras propiedades, la densidad, la cohesión efectiva ( $C'_0$ ) y el ángulo de rozamiento efectivo ( $\emptyset'$ ). La densidad es fácil de estimar porque depende de la composición, la humedad y el grado de compactación de los residuos, sin embargo, el valor de la  $C'_0$  y el  $\emptyset'$  es mucho más complejo de obtener por lo que se debe recurrir a ensayos de laboratorio.

Por su parte, (Colomer 2006) realizó un exhaustivo estudio de las propiedades de los residuos de distintos depósitos controlados e indicó que los valores de  $C'_0$  y  $\emptyset'$  presentan una gran dispersión entre depósitos e incluso entre estaciones temporales o entre varias zonas de una misma instalación. Este autor achacó el problema a la heterogeneidad de la masa de residuos, y basándose en los resultados obtenidos por otros autores, indicó que los valores de la  $C'_0$  se pueden situar entre  $0 \text{ t/m}^3$  y  $12,64 \text{ t/m}^3$  y los del  $\emptyset'$  entre  $0^\circ$  y  $53^\circ$ .

Para garantizar la estabilidad del talud el FS debe oscilar entre 1,3 y 1,5). Por lo general, este valor suele ser superior cuando se construyen taludes con pendientes entre 1V:3H y 1V:5H, aunque, como se ha indicado anteriormente esto depende de las propiedades de los residuos y de otros factores como las condiciones climatológicas y la altura del talud.

Algunos accidentes atribuidos a una falta de estabilidad por la elevada altura y pendiente excesiva del talud son:

**Tabla 1: Histórico de accidentes por pendiente excesiva de taludes (1977-2016)**

Año	Relleno Sanitario (RS)	País	Referencias
2016	RS. de Hrybovichi	Ucrania	(UNIAN 2016a; UNIAN 2016b)
2005	RS. de Abanilla	España	(Colomer & Gallardo 2005)
1998	RS. de Hiriya	Israel	(Klein 2003)
1995	RS. de Beirolas	Portugal	(Santayana & Veiga 1998; Castelao et al. 1999)
1993	RS. de Umraniye-Hekimbasi	Turquia	(Kocasoy & Curi 1995; Rushbrook 1999; Fahey et al. 2002; Blight & Fourie 2003; Díaz et al. 2003; Cointreau 2006; Qian et al. 2002)
1977	RS. de Sarajevo	Bosnia	(Econs S.A 2003; UNECE 2004)

### 3.2 Saturación de la masa de residuos

La infiltración del agua de lluvia, el vertido de lodos o el recirculado de lixiviados sin control ocasiona, por una parte, un aumento de la presión intersticial en las capas centrales e inferiores por saturación de la masa de residuos, y por otra, la acumulación de lixiviado en el fondo del vaso cuando los sistemas de drenaje están obstruidos o simplemente no existen. Esta situación de saturación conlleva una reducción significativa de la  $C'_o$  entre los residuos y del coeficiente de rozamiento entre estos y la geomembrana que si es lo suficiente elevada ocasiona la pérdida de estabilidad y el consecuente deslizamiento. Algunos accidentes asociados a la saturación y pérdida de estabilidad son:

**Tabla 2: Histórico de accidentes por saturación (1977-2016)**

Año	Relleno Sanitario (RS)	País	Referencias
2016	RS. Guatemala	Guatemala	(Muniguat 2006; Muniguat 2008; Press 2016; EFE - Guatemala 2016)
2011	RS. de Baguio	Filipinas	(Moran 2011; EFE 2011)
2005	RS. de Bandung	Indonesia	(EFE 2005a; EFE 2005b; Koelsch et al. 2005; Lavigne et al. 2014)
2003	RS. de Guadalupe	Brasil	(Seward 2000; Prois 2003)
2003	RS. de Ano Liossia	Grecia	(Colomer & Gallardo 2005)
2002	RS. de Loma Los Colorados	Chile	(Colomer & Gallardo 2005)
2002	RS. de Chongqing	China	(Colomer & Gallardo 2005)

2002	RS. de Mpewere	Uganda	(Johannessen et al. 1999; Lemoine 2003)
2001	RS. de Navarro	Colombia	(Espinace 2003)
2000	RS. de Payatas	Filipinas	(MUNDO 2000; Kölsch 2000; Merry et al. 2005; Jafari et al. 2013; Cointreau 2006)
1997	RS. de Doña Juana	Colombia	(Hendron et al. 1999; Johannessen et al. 1999; Econs S.A 2003)
1996	RS. de Bens	España	(Colomer & Gallardo 2005)

Por lo tanto se debe considerar el volumen de lodos vertidos o lixiviados recirculados y, en zonas con precipitaciones intensas, el control de la infiltración del agua de lluvia.

### 3. Deslizamiento del DC Santa Marta

Los depósitos controlados de Chile incorporan impermeabilización en el fondo y los taludes del vaso, cuenta con sistemas de captación de biogás, compactan con maquinaria los residuos depositados y generalmente aplican capas de cobertura diaria para evitar la proliferación de vectores, la dispersión de vuelos, y en definitiva, para controlar la infiltración de agua de lluvia y la migración del biogás generado. La estructura de estos depósitos debe cumplir con lo establecido en la legislación vigente de Chile (DS 189 de 2008). Si bien es cierto que la existencia de este marco legislativo debiera dar seguridad actualmente se siguen registrando accidentes como el que se analizan a continuación.

#### 4.1 Ubicación

El relleno sanitario de Santa Marta se encuentra ubicado en el límite entre la comuna de San Bernardo y Talagante. Concretamente esta instalación se emplaza a 12,5 km al poniente de la intersección existente entre la Ruta 5 Sur y el Rio Maipo. Situada a 30 km del centro de la ciudad de Santiago (Chile).

**Figura 1: Localización del Relleno Sanitario Consorcio Santa Marta.**



## 4.2 Antecedentes

Gestionado por el Consorcio Santa Marta S.A. empezó a operar en el año 2002 tras obtener la Resolución de Calificación Ambiental positiva (RCA) número 433/2001. El relleno y las áreas de protección abarcan 296 ha, de las cuales 77 ha se destinaron inicialmente al vertido de residuos sólidos urbanos. En esta instalación se gestionan los residuos de más de 7 millones de habitantes de 19 comunas de Santiago de Chile.

Las previsiones iniciales estimaron la recepción de 60 mil toneladas de residuos mensuales y, considerando una densidad promedio de  $0,9 \text{ t/m}^3$  se determinó la colmatación del vaso para el año 2022.

Las celdas unitarias conformadas en el relleno sanitario presentan una altura aproximada de 8 m y sobre estas se aplica una capa de cobertura diaria de 50 centímetros de árido. El vertido de residuos se ha realizado sobre una base impermeabilizada, y cuenta con sistemas de captación de biogás, compactación y otros sistemas de acuerdo con lo establecido en la legislación vigente del país (DS 189 de 2008).

Algunos datos interesantes de la fase de explotación antes de sufrir el colapso son:

En el año 2004 el Consorcio Santa Marta solicitó tres estudios al Grupo de Geotecnia y Residuos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso PUCV (Carvajal 2016). Estos, con la finalidad de implantar un sistema de operación eficiente y por su parte ampliar y mejorar los sistemas de evacuación de lixiviados fueron: Programa de Monitoreo del Relleno Sanitario de Santa Marta, Diseño del Sistema de Evacuación Adicional de Líquidos Lixiviados del Relleno Sanitario Santa Marta y Plan de Crecimiento del Relleno Sanitario de Santa Marta.

Seis años más tarde, el Grupo de Geotecnia de la PUCV y el Consorcio de Santa Marta determinaron a través de un estudio técnico que la densidad global de la masa de

residuos depositada alcanzaba un promedio de 1,2 t/m<sup>3</sup> (superior a las 0,9 t/m<sup>3</sup> indicadas anteriormente) por lo que la vida útil del depósito era factible ampliarla. Los riesgos identificados en aquella época se centraron en la posibilidad de sufrir deslizamientos por falta de estabilidad en la zona de vaguada.

El 1 de abril de 2011 el Consorcio Santa Marta mediante la RCA número 0631/2011 obtuvo autorización del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) para el vertido de lodos en el relleno sanitario con un máximo del 6% sobre el total depositado (aproximadamente unas 85.375 t/anuales).

Un año más tarde el SEA, con la conformidad de 12 ministerios y del Gobierno Regional, emitió la RCA con número 076/2012 que autorizó una serie de modificaciones. Estas, basadas en la ampliación de la capacidad volumétrica de la instalación permitieron proyectar la colmatación de la instalación para el año 2035 (13 años más). Algunas de las modificaciones que contempló la autorización citada fueron, por una parte, incrementar en 10,6 ha la zona de vertido y elevar la cota máxima de la masa de residuos depositados a 100 m, y por otra, la posibilidad de duplicar paulatinamente la cantidad de residuos depositados hasta alcanzar las 177 mil toneladas mensuales en el año 2036. A finales del 2015 esta cantidad se estima que fue de 125 mil toneladas mensuales (Consortio Santa Marta 2016).

El 11 de julio de 2014 el Consorcio Santa Marta mediante Resolución Exenta número 4.000 obtuvo autorización por la SEREMI para depositar en el relleno sanitario 30 toneladas de residuos con asbesto (SEREMI 2014). Un año más tarde la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) indicó que se habían depositado desde el año 2014 aproximadamente 110 mil toneladas de lodos provenientes de agroindustria y de empresas sanitarias. Estos residuos, que sumaron finalmente 133 mil toneladas, fueron dispuestos directamente en el frente de trabajo como co-disposición en forma homogénea, es decir, mezclados permanentemente con los residuos (Consortio Santa Marta 2016).

Por su parte, algunos medios de comunicación indicaron que en el relleno sanitario también se depositaron tarros con pintura, envases de diluyentes, aerosoles, botellas de detergentes, residuos hospitalarios y otras sustancias peligrosas como el “carburo” o asbesto (Carvajal 2016). Aunque, hay que indicar que este tipo de residuos se deposita generalmente en cantidades aceptables por ser fracciones presentes en la recogida de residuos domiciliarios.

El 28 de diciembre de 2015 el Consorcio Santa Marta mediante resolución número 108.103 obtuvo autorización por la SEREMI para depositar en el relleno sanitario residuos hospitalarios (Carvajal 2016). Por su parte la SEAM resolvió que no había que hacer ningún tipo de evaluación para permitir que Santa Marta recibiera los residuos hospitalarios, añadiendo que el Consorcio Santa Marta era el responsable de la correcta gestión.

El 11 de enero de 2016 varios empleados del relleno sanitario de Santa Marta indicaron que en la zona de vertido se habían formado grietas y que existían afloramiento de lixiviado en varios puntos (SMA 2016).

**Figura 2: Formación de grieta en el Relleno Sanitario Consorcio Santa Marta.**



#### 4.2.2 Colapso

El 15 de enero de 2016 a las 18:40h se produjo el deslizamiento de más de 200 mil metros cúbicos de residuos hacia la vaguada “El Bobal” (Figura 3). Las dimensiones del deslizamiento que afectó al talud frontal de la instalación se estima que correspondieron a 200 metros de ancho y 400 metros de largo. La diferencia de cotas entre la entrada y salida del círculo de falla se estimó que fue del orden de 70 m (Geotécnia Ambiental 2016). Este incidente afectó a 8 ha del área de disposición final y aproximadamente el 10 % del volumen total de residuos depositados (Consortio Santa Marta 2016).

El día 16 se ejecutó un Plan de Medidas de Seguridad en el sector afectado que involucró la desconexión de las tuberías de recolección de biogás, la detención de la planta de generación eléctrica y la demarcación de un perímetro de seguridad en torno al lugar del deslizamiento para evitar el ingreso de personas y de maquinaria. Esta situación se prolongó hasta verificar la estabilidad de la zona afectada por el deslizamiento. Por otra parte, para evitar la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas ese día se colocó un pretil aguas abajo de la zona afectada por el derrumbe (Coddou 2016). En paralelo varios funcionarios de la SEREMI de Salud realizaron un recorrido por todo el perímetro del área afectada para levantar acta de lo ocurrido.

**Figura 3: Deslizamiento en el Relleno Sanitario de Santa Marta.**



El día 17 la SEREMI, tras realizar un recorrido por todo el perímetro resolvió mediante acta que se debía suspender inmediatamente la operación de disposición de residuos en la zona afectada, permitiéndose la operación exclusivamente en una parte alejada de la zona que no revistiera riesgo para la salud de los trabajadores (Coddou 2016).

El día 18 la SEREMI realizó de nuevo un recorrido por todo el perímetro de la zona afectada y confeccionó un Acta de Inspección. Esta acta resolvió, entre otros aspectos, que no existían nuevos deslizamientos y determinó la prohibición del vertido de lodos y de residuos domiciliarios y asimilables provenientes de empresas particulares. Continuó así la recepción de residuos provenientes de los municipios exclusivamente en la zona segura. A las 17:00h de ese mismo día se inició el incendio que afectó la parte deslizada y que obligó a detener la disposición de residuos en toda la instalación (Figura 4).

El día 19 de enero de 2016 la resolución número 0300 de la SEREMI de Salud obligó a paralizar la recepción de residuos en toda la instalación por la dificultad de extinguir el incendio (Coddou 2016).

Ante la imposibilidad de acceder a la zona de derrumbe hasta que se garantizará la estabilidad de la masa de residuos deslizada el Consorcio Santa Marta realizó operaciones de acopio de árido en la zona segura. Se pretendía con ello habilitar un camino perimetral que permitiera, por una parte, limitar la propagación del incendio, y por otra, que los equipos de emergencia pudieran acceder para extinguir el incendio.

El día 20 se coordinaron las operaciones de extinción del incendio utilizando la maquinaria disponible, el árido acopiado y los equipos de emergencia del cuerpo de

bomberos de San Bernardo. La contaminación atmosférica durante esos días afectó a los municipios de Puente Alto, San Bernardo, La Florida, Talagante, Padre Hurtado, Maipú, Lo Espejo y Pedro Aguirre Cerda y a la ciudad de Santiago de Chile.

**Figura 4: Incendio en el Relleno Sanitario de Santa Marta.**



El día 22 el SMA mediante resolución exenta número 58 ordenó la detención inmediata del vertido de residuos, así como de la captación de biogás durante 15 días (Coddou 2016). El incendio se declaró totalmente extinguido el mismo día a las 20:15h.

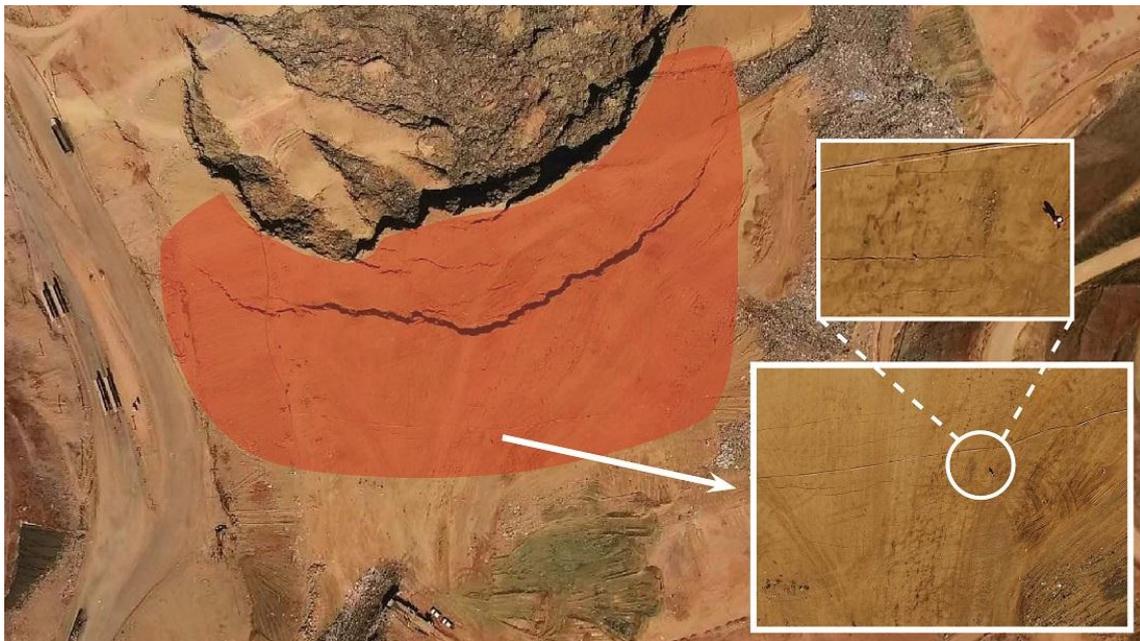
El día 3 de febrero el Consorcio Santa Marta, con el respaldo expertos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y de la Universidad de Santiago, presentó varios informes técnicos que solicitaban la reapertura parcial del relleno sanitario. Estos informes alegaron que se dejarían de verter lodos temporalmente y que el vertido de los residuos de las 19 comunas se depositaría en una zona segura (Seal et al. 2016). Adicionalmente, el Consorcio Santa Marta presentó ante la Corte de Apelaciones de San Miguel un informe judicial con número de ingreso 166-2016 en el que afirmó que se había dado cumplimiento a la normativa ambiental vigente en la operación del relleno sanitario (Coddou 2016).

El día 5 la Corte de Apelaciones de San Miguel desestimó la reapertura parcial solicitada por la empresa.

El día 9 la SMA levantó cargos contra el Consorcio Santa Marta por el vertido de lodos sin autorización y solicitó al Tribunal Ambiental de Santiago (TAS) el cierre parcial del relleno sanitario durante 15 días. Durante este periodo de tiempo los residuos fueron vertidos momentáneamente en otros depósitos controlados de la zona (SMA 2016).

Por último, es importante indicar que durante esos días la SMA inspeccionó la zona y detectó la formación de grietas en la parte superior del relleno sanitario, además de la obstrucción de los sistemas de evacuación del lixiviado y el biogás generado en la zona afectada. Ante esta situación las tareas de contención se centraron en reparar las grietas y recuperar la operatividad de los sistemas de evacuación de lixiviados y captación de biogás (Figura 5).

**Figura 5: Grietas posteriores al incidente del Relleno sanitario de Santa Marta.**



#### 4.2.3 Observaciones

Los tres proyectos solicitados en el año 2004 demostraron que existía cierta preocupación por desarrollar planes de operación acordes con el marco legislativo, y por su parte, el segundo proyecto que se centró en ampliar y mejorar el sistema de evacuación de lixiviados existente pretendía reducir el riesgo de saturación de la masa de residuos en su base.

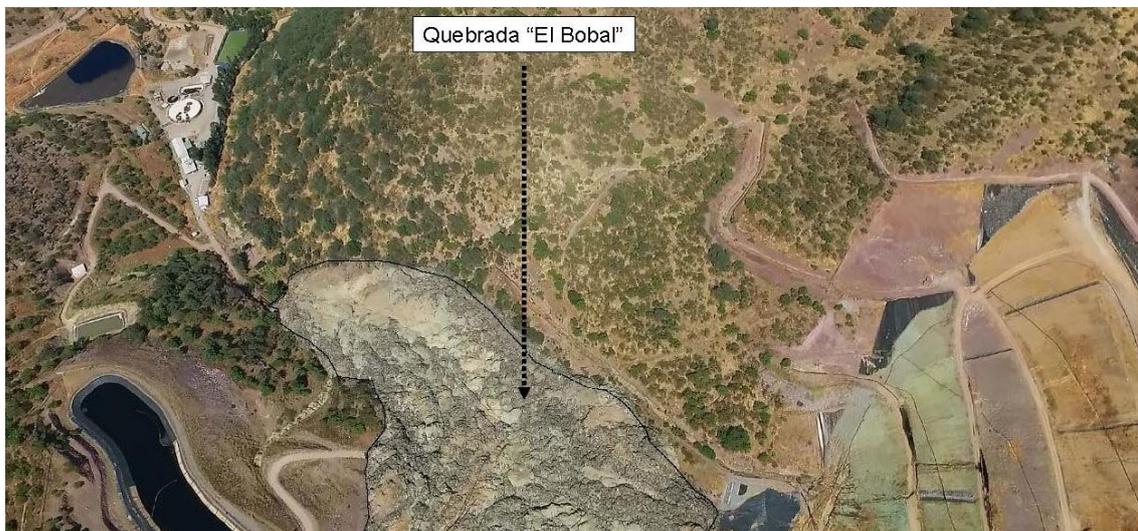
En cuanto al derrumbe cabe indicar que inicialmente este se achacó al vertido incontrolado de más de 133 mil toneladas de lodos, así como al mal trabajo de compactación de los residuos depositados (Carvajal & Castro 2016). Un extrabajador manifestó que para evitar los problemas de encharcamiento que generaba el vertido de lodos directamente en la superficie del relleno se recurrió siempre a su mezcla con los residuos recibidos de la recogida domiciliaria (Carvajal 2016).

Por lo tanto, el vertido de lodos pudo contribuir en la formación de vías preferenciales incrementando el volumen de lixiviado acumulado en la parte central e inferior del vaso. Uno de los problemas asociados a ello es que la saturación de la masa de residuos

debilita la cohesión y reduce el coeficiente de rozamiento con la base inferior del relleno. Esta situación conlleva inmediatamente un proceso de reestructuración que desestabiliza la estructura. Además, hay que indicar que estos incidentes suelen ocurrir en los rellenos sanitarios situados en vaguada o ladera porque generalmente la superficie del fondo del vaso presenta una elevada pendiente o está formada por terrazas a distintos niveles que facilitan el deslizamiento. La formación de grietas en la superficie del relleno, como hemos observado en la Figura 2, es un indicativo previo a este tipo de incidentes.

Más concretamente en el caso de Santa Marta es importante indicar que el riesgo ambiental que se tuvo que asumir por la migración de lixiviados en la zona fue, por una parte, la contaminación del subsuelo y de las aguas subterráneas por infiltración, y por otra, la contaminación de las masas de agua superficiales por afloramientos. Bajo esta premisa en el año 2001 la empresa Gestión Ambiental Consultores – Ecology & Environment Inc emitió un informe indicando que la roca donde se emplaza el relleno sanitario presenta una alta permeabilidad. Por lo tanto, la masa de residuos que se extendió sobre la vaguada “El bobal” (Figura 6), que es una zona anexa a la impermeabilizada, posee un elevado riesgo de contaminación del suelo y aguas subterráneas.

**Figura 6: Masa de residuos deslizada sobre la vaguada.**



Transcurridas 24h desde el incidente, y eliminado el riesgo de contaminación de aguas superficiales por la colocación de un pretil de recolección, el riesgo de incendio y explosión en la zona afectada empezó a aumentar por la desconexión de las tuberías de captación de biogás ese día. Otro factor que elevó el riesgo de incendio fue que en aquella fecha la Región Metropolitana estaba atravesando una ola de calor con temperaturas superiores a 38°C (EFE 2016a; EFE 2016b). En base a ello las causas del incendio que se produjo el día 18 se achacaron inicialmente al efecto lupa de la mezcla de elementos metálicos, vidrios o similares (Coddou 2016) y a la elevada inflamabilidad de algunos elementos presentes en los residuos domiciliarios, como el “carburo” (Carvajal 2016).

Otra de las causas pudo ser el incremento de temperatura que genera la degradación aerobia de los residuos cuando estos están expuestos a la intemperie, suficiente para originar incendios por combustión espontánea. El incendio no pudo ser extinguido hasta transcurridos cuatro días, por lo que terminó afectando a ocho municipios cercanos y a la ciudad de Santiago de Chile. Hay que indicar que este incidente no reportó daños personales ni víctimas mortales (Seal et al. 2016).

Extinguido el incendio se volvió a ordenar la desconexión de los sistemas de captación durante 15 días. Este hecho favoreció la acumulación de biogás en la masa de residuos aumentando la presión interna en la zona, aunque no se registraron nuevos deslizamientos. El riesgo de sufrir un nuevo incendio fue bajo porque el último incendio quemó las fracciones combustibles y la degradación aeróbica se paralizó casi por completo.

Actualmente la situación en esta instalación es de contención y se están ejecutando las intervenciones necesarias para minimizar el impacto generado.

#### **4. Discusión y consideraciones**

El estudio del comportamiento geotécnico de un relleno sanitario es muy complicado porque las características del suelo son completamente diferentes a las de los residuos depositados. Aun cuando existen sistemas eficientes de evacuación de lixiviados y biogás se ha demostrado desde la década de los años noventa que se producen saturaciones en la base inferior de la masa de residuos y que ello incrementa el riesgo de sufrir deslizamientos (Massacci et al. 1993). Estos generalmente se producen en una zona en la que predominan asentamientos secundarios, es decir, los ocasionados por la degradación de la materia orgánica en condiciones anaerobias.

Otro aspecto a considerar, es que el vertido de algunos residuos, tales como cenizas, escorias y residuos químicos son altamente compresibles y parcialmente solubles. Ante esta situación la infiltración de agua de lluvia, la recirculación de lixiviados o el vertido de lodos de forma incontrolada contribuye activamente a la formación de macro cavidades que desestabilizan la masa de residuos (Sowers 1973). Es bien conocido que los deslizamientos en estas instalaciones suelen producirse o bien de forma inesperada cuando ocurren episodios de lluvias torrenciales o de forma gradual cuando se vierten lodos o se recircula lixiviado de forma incontrolada. En el segundo caso la formación de grietas en la superficie es un aviso previo y en ambos una de las razones del colapso es que la infiltración forma caminos preferenciales que arrastran las partículas más finas al fondo del vaso desestabilizando la estructura. Por lo tanto, la situación en el interior de la masa de residuos cuando ocurren estos episodios es, por una parte que se producen macroporos en la zona superior, y por otra parte que se satura la masa de residuos de las zonas centrales e inferiores reduciéndose la capacidad de resistencia (Sowers 1973).

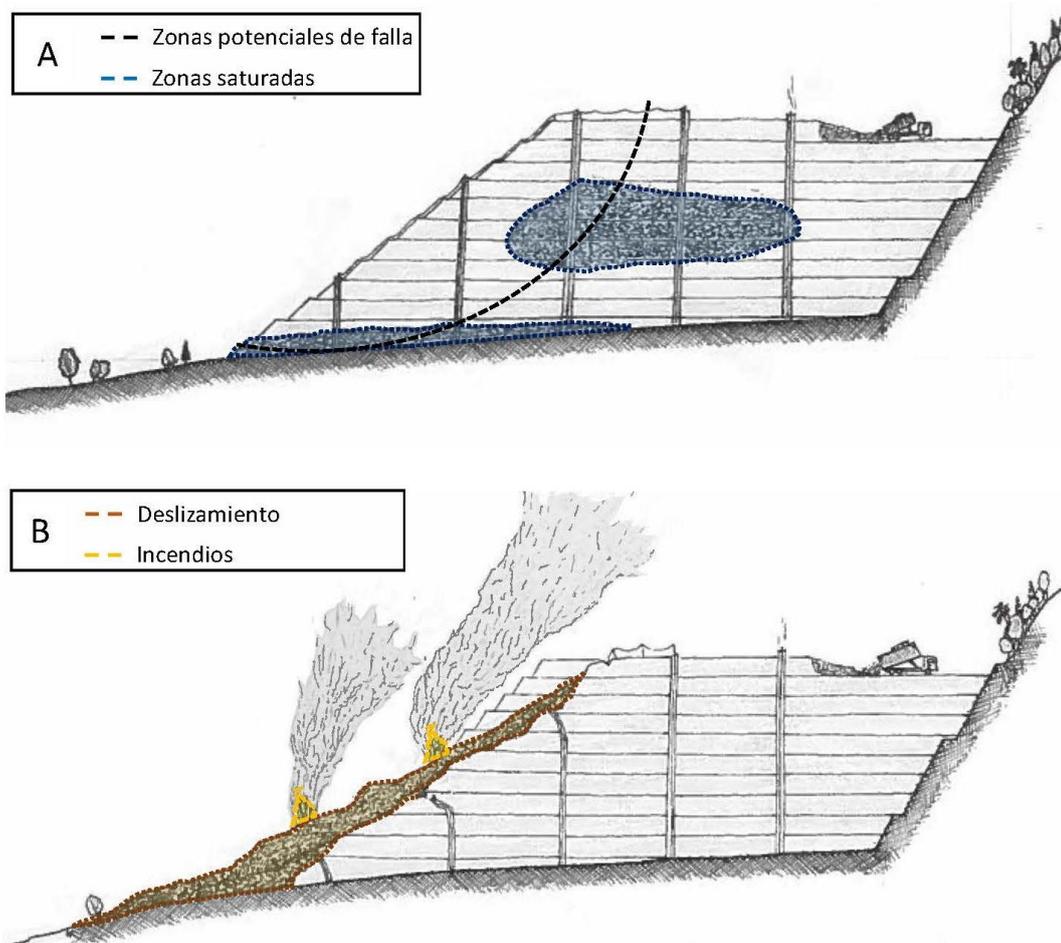
Posterior al deslizamiento, la masa de residuos generalmente sufre de nuevo procesos de degradación aerobia que genera incrementos de temperatura de más de 60°C. Esta situación puede dar origen a la combustión espontánea de algunas fracciones de residuos y propagarse rápidamente porque la ruptura de los sistemas de captación de

biogás en la zona afectada provoca la acumulación de metano, gas altamente inflamable (Sowers 1973).

La Figura 7 muestra conceptualmente un deslizamiento en el que predomina el asentamiento secundario. La magnitud de este tipo de incidentes depende, entre otros, de la composición de los residuos, la humedad y la temperatura.

Para reducir el riesgo de sufrir estos deslizamientos el primer paso es cumplir con la legislación vigente, aunque ello no implica que el riesgo se elimine por completo porque depende, entre otras variables, de la operación, de la morfología del terreno y de las condiciones climáticas de la zona. En lo referente al diseño de taludes, cabe indicar que la normativa de países como Canadá exigen una inclinación mínima de 1V:4H, es decir, una pendiente del 14%. Sin embargo, en países como Chile o EE.UU, estas exigencias se limitan a una inclinación máxima de 1V:3H. A pesar de ello hay que indicar que taludes con estas pendientes, en condiciones normales, permanecen estables incluso a grandes alturas (Colomer et al. 2009). No obstante, cuando se registran episodios de lluvia intensas, movimientos sísmicos, explosiones internas por la acumulación de gases o vertidos incontrolados de lodos y/o recirculado de lixiviados ocurren estos deslizamientos.

**Figura 7: Deslizamiento conceptual.**



Para analizar la estabilidad del relleno sanitario cuando ha ocurrido un deslizamiento como el descrito en este trabajo se deben considerar en las zonas afectadas al menos los siguientes aspectos:

- Estabilidad actual y aplicación de medidas de recuperación para garantizar la contención sanitaria en las zonas de vaguada. Un ejemplo sería modelar las pendientes naturales de la base del vaso y destacar las depresiones que sean identificadas (Cancelli 1987).
- Reducir en la medida de lo posible la infiltración de agua de lluvia, así como el vertido de lodos o el recirculado incontrolado de lixiviados.
- Modelizar los asentamientos que experimenta la masa de residuos en zonas de talud y en toda la superficie del relleno sanitario periódicamente.

Por su parte, en toda la superficie del relleno sanitario se deben considerar al menos:

- Propiedades geotécnicas de los diferentes estratos de la masa de residuos.

- Propiedades geotécnicas del suelo de coberturas diarias, temporales y finales.
- Inclinación y altura de los taludes.
- Presencia y cantidad de biogás en el interior del relleno sanitario.
- Presencia y cantidad de lixiviados en el interior del relleno sanitario.

En cuanto a la estabilidad de la masa de residuos los datos más importantes a considerar son la altura del talud, la densidad, el coeficiente de cohesión y el ángulo de rozamiento. Aunque, hay que indicar que la naturaleza heterogénea de los residuos y las dimensiones de estos cuando se vierten otro tipo de residuos, por ejemplo los voluminosos, dificulta la obtención de muestras representativas y el análisis de la estabilidad se complica.

En vista de ello se impone la necesidad de que la estabilidad geotécnica del talud frontal del relleno sanitario sea la máxima posible, aun en condiciones favorables. Los cálculos realizados deben estar siempre del lado de la seguridad, por ello, entre todos los procedimientos disponibles para la resolución de los problemas asociados a la estabilidad, el método más adecuado es buscar el punto de la instalación que presenta una mayor probabilidad de deslizamiento y por lo tanto un menor factor de seguridad.

En estas instalaciones el efecto de la descomposición de la materia orgánica provoca cambios inesperados en los parámetros de estabilidad, que además se agravan cuando ocurre un movimiento sísmico. Algunos datos a considerar que están del lado de la seguridad son:

- Cohesión efectiva inferior a  $C'_0 \leq 3 \text{ t/m}^2$  (Cancelli 1987). Se recomiendan valores de entorno a  $C'_0 = 1 \text{ t/m}^2$  (Colomer et al. 2009).
- Ángulo de rozamiento  $\leq 26^\circ$  (Cancelli 1987). Se recomiendan valores de entorno a  $\phi' = 14^\circ$  (Colomer et al. 2009).
- Densidad de la masa de residuos inferior a  $\rho \leq 1.200 \text{ kg/m}^3$ . Se recomiendan valores de entorno a  $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$  (Colomer et al. 2009).

A pesar de todo, hay que indicar que taludes con inclinaciones de 1V:2,5H ( $21,80^\circ$ ) habiéndose calculado con un factor de seguridad recomendado han permanecido estables durante mucho tiempo, aun en condiciones de precipitaciones intensas (Colomer et al. 2009).

Por ello, es de suponer que los valores de  $C'_0$  y  $\phi'$  en la masa de residuos realmente son sensiblemente mayores a los recomendados y permiten dar la suficiente estabilidad, siempre que se el sistema de operación sea adecuado y los lixiviados y el biogás se evacuen convenientemente.

## 5. Conclusiones

El deslizamiento ocurrido el día 15 de enero del 2016 en el relleno sanitario de Santa Marta formó una lengua de residuos que se extendió más de 1.000 m desde la parte más elevada del talud frontal hacia la vaguada "El Bobal". La zona afectada en esta vaguada no contaba con impermeabilización por lo que existe un elevado riesgo de contaminación del suelo y aguas subterráneas. Por su parte, el riesgo de contaminación de las aguas superficiales por afloramiento del lixiviado contenido en la masa de residuos deslizada fue eliminado con la incorporación de un petril de contención que actúa como sistema de drenaje y evacuación. El deslizamiento no causó daños personales ni víctimas mortales.

Posterior a este deslizamiento se produjo un incendio en la zona afectada que no pudo ser extinguido hasta transcurridos cuatro días. Durante este periodo de tiempo la contaminación atmosférica generada por la espesa pluma de humo afectó a la población residente de los municipios de Puente Alto, San Bernardo, La Florida, Talagante, Padre Hurtado, Maipú, Lo Espejo y Pedro Aguirre Cerda y de la ciudad de Santiago de Chile. Por su parte, el incendio tampoco causó daños personales ni víctimas mortales.

Los días posteriores a la extinción del incendio se paralizó durante 15 días la extracción de biogás, esta acción pudo incrementar la presión intersticial en el interior de la masa de residuos desestabilizando de nuevo la estructura. Sin embargo, durante ese periodo de tiempo no se registró ningún incidente y las actividades de restablecimiento de la estabilidad de toda la zona pudieron realizarse con normalidad. Otro riesgo que se tuvo que asumir al detener la extracción de biogás fue que el metano acumulado y la combustión espontánea de parte de la masa deslizada generará explosiones o incendios en cualquier punto de la zona afectada, aunque el incendio anterior eliminó gran parte de las fracciones combustibles reduciendo el riesgo de padecer nuevos episodios de esta índole.

A fin de garantizar la estabilidad del talud y estar del lado de la seguridad se recomienda reestructurar la zona afectada formando un talud frontal que presente, por una parte, una inclinación 1V:4H, es decir, una pendiente máxima del 14° y por otra, bermas para la división de los diques con una diferencia de cota máxima de 8 m. Es recomendable también que las bermas ejecutadas tengan una anchura mínima de 5 m para aumentar el FS. Además, otra ventaja asociada a las bermas es que estas pueden ser utilizadas como paso de maquinaria, zonas de acopio de material de cobertura, rutas de acceso para resolver incidentes o simplemente para ejecutar operaciones de mantenimiento.

Finalmente, para evitar en la medida de lo posible la saturación de la masa de residuos se recomienda evitar el vertido de lodos o el recirculado incontrolado de lixiviados sobre la masa de residuos dispuesta. En cuanto al residuo deslizado sobre la zona que no dispone de impermeabilización se recomienda su retirada siempre que ello no conlleve desestabilizar la base del nuevo talud formado.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte del Programa Iberoamericano Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), de la Red Iberoamericana en Gestión y Aprovechamiento de Residuos (REDISA), de la Universitat Jaume I y de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso a través del Concurso de Vinculación Académica Internacional (Proyecto Ingeniería 2030).

## Referencias bibliográficas

- Blight, G.E. & Fourie, A.B., 2003. A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. *Geotechnical and Geological Engineering*, 00, pp.1–34.
- Cancelli, A., 1987. Solid and Refuse Stability in Sanitary Landfill. *Proceedings International Sanitary Landfill Symposium on Process Technology and Environmental Impact of Sanitary Landfill*. pp. 19–23.
- Carvajal, V., 2016. Ex trabajador de Santa Marta revela las graves irregularidades que facilitaron el desastre ambiental. *Centro de Investigación Periodística (CIPER)*, p.1.
- Carvajal, V. & Castro, M., 2016. Vertedero Santa Marta obtuvo en 2011 permiso para funcionar 13 años más y duplicar basura acumulada. *Centro de Investigación Periodística (CIPER)*, p.1.
- Castelao, M. et al., 1999. Beirolas sanitary landfill closure and post-closure use as a park. In *7th International Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italy.
- Coddou, M.A., 2016. *Recurso de protección N° 166-2016*, Santiago de Chile, Chile.
- Cointreau, S., 2006. Occupational and Environmental Health Issues of Solid Waste Management. *The world Bank Group*, 53(9), p.57.
- Colomer, F. et al., 2009. Evaluación del riesgo geotécnico en vertederos de residuos sólidos: identificación de los principales peligros. In *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. pp. 1–18.
- Colomer, F.J., 2006. Análisis y sistematización de la seguridad medioambiental de los vertederos de residuos urbanos y asimilables. Aplicación a las balsas de lixiviados. *Tesis doctoral*. Valencia, España.
- Colomer, F.J. & Gallardo, A., 2005. Identificación de peligros asociados a un vertedero controlado. , pp.86–97.
- Consortio Santa Marta, 2016. Entrega de antecedentes según resolución exenta 48. Santiago de Chile, Chile.

- Díaz, L., Röder, S. & Nguyen, B., 2003. Solid waste management in economically developing countries.
- Econs S.A., 2003. Safety in landfills: photographic and documentation. Bioggio, Switzerland, p. 18.
- EFE, 2005a. 40 muertos por una avalancha de tierra. *Diario de Cuyo*. San Juan, Argentina.
- EFE, 2016a. Aseguran que el 30 por ciento del incendio en un basurero de Santiago está controlado. *Agencia EFE*, p.1.
- EFE, 2011. Filipinas: al menos 26 muertos y seis desaparecido por el tifón “Nanmadol.” *Opinión*. Cochabamba, Bolivia.
- EFE, 2005b. Mal tiempo causa 40 muertos por alud en Indonesia. *El Universo*. Guayaquil, Ecuador.
- EFE, 2016b. Santiago de Chile, cubierto de humo y hedor por incendio en un vertedero. *Agencia EFE*, p.1.
- EFE - Guatemala, 2016. Basurero en Guatemala vuelve a operar tras el derrumbe que causó cuatro muertos. *eldiario*. Madrid, España.
- Espinace, R., 2003. Geotecnia ambiental en rellenos sanitarios. *Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV)*. Valparaíso, Chile. p.43.
- Fahey, M., Newson, T.A. & Fujiyasu, Y., 2002. Engineering with tailings. Environmental geotechnics. *Proceedings of the 4th International Congress on Environmental Geotechnics*. Balkema, Lisse, Netherlands, 2, pp.947–973.
- Geotécnia Ambiental, 2016. Asistencia Técnica Emergencia Relleno Santa Marta. 889-GM-1084-C2, Santiago de Chile.
- Hendron, D.M. et al., 1999. Investigation of the cause of the 27 september 1997 slope failure at the Doña Juana Landfill. *7th International Waste Management and Landfill Symposium*, 3, pp.545–567.
- Jafari, N.H., Stark, T.D. & Merry, S., 2013. The July 10 2000 Payatas Landfill Slope Failure. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, 2(3), pp.208–228.
- Johannessen, L.M., Boyer, G. & Mikkil, L., 1999. Observations of Solid Waste Landfills in Developing Countries: Africa, Asia, and Latin America. *Urban Development Division Waste Management Anchor Team. World Bank Report*, pp.47.
- Klein, A., 2003. Geotechnical and geoenvironmental consultant, *M. Sc. Meshilah.com*. 49

- Einstein St. Haifa 34602, Israel
- Kocasoy, G. & Curi, K., 1995. The Úmraniye - Hekimbasi open dump accident. *Waste Management&Research*, 13, pp.305–314.
- Koelsch, F. et al., 2005. Stability of Landfills – the Bandung Dumpsite Disaster. In *10th International Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italy.
- Kölsch, P., 2000. Landslides Standsicherheitsversagen. *Geo Und Umwelttechnik GmbH*.
- Lavigne, F. et al., 2014. The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia. *Geoenviron Disasters*, 3(3).
- Lemoine, C.H., 2003. Bioreactor landfills. An innovative solution or a risky experiment. *Alternative Service Delivery i Kampala City Council*. Kampala City, Uganda.
- Massacci, G. et al., 1993. Analysis and monitoring geotechnical parameters in sanitary landfill. In *Proceeding Sardinia 93. Four International Landfill Symposium*. Cagliari, Italy, p. 13.
- Merry, S.M., Kavazanjian Jr., E. & Fritz, W.U., 2005. Reconnaissance of the July 10 , 2000 , Payatas Landfill Failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 19(2), pp.100–107.
- Moran, L., 2011. The Garbage landslide: Five missing as rubbish floods through city after typhoon smashes walls of dump site. *Daily mail*. Londres, UK.
- MUNDO, E., 2000. Ya son 139 los muertos por el derrumbe del vertedero en Filipinas. Agencia *EFE*.
- Muniguate, 2008. Deslave en el basurero con saldo trágico. *Municipalidad de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala.
- Muniguate, 2006. Deslizamiento de tierra en vertedero. *Municipalidad de la Ciudad de Guatemala*, Guatemala.
- Associated Press, 2016. Guatemala declares 24 missing in garbage landslide at dump. *Associated Press*. Nueva York, EE.UU.
- Prois, T.A., 2003. Emergency relief to victims of floods&landslides. Balance requested from the ACT Alliance. In *ACT International, Action by Churches Together*. Geneve, Switzerland.
- Qian, X. et al., 2002. Geotechnical aspects of landfill design and construction. *Prentice Hall*, pp 717.
- Rushbrook, P., 1999. Getting from subsidence landfill to sophisticated landfill. *Waste*

- Management&Research ISWA*, 17(1), pp.4–9.
- Santayana, P. & Veiga, A., 1998. Behaviour of a slide area at a Lisbon's MSW landfill after implementation of stabilizing measures. *Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics*. Lisbon, Portugal.
- Seal, C. et al., 2016. *Informe N°1 Sobre las medidas de restauración a corto plazo y restauración de la operación del relleno sanitario Santa Marta*,
- SEREMI, 2014. *Resolución Exenta N° 4000*, Santiago de Chile, Chile.
- Seward, T., 2000. Guadalupe landfill landslide. *San Francisco Bay Regional Water quality Control Board, Executive Officer's Report*. San Francisco, California.
- SMA, 2016. *Fórmula de cargos que indica a Consorcio Santa Marta*, Superintendencia del Medio Ambiente, Santiago de Chile.
- Sowers, G., 1973. Settlement of Waste Disposal fills. *8a Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineerings*. pp. 207–250.
- UNECE, 2004. Management of waste and contaminated sites. Studies: Bosnia Herzegovina, *UNECE*, 6, pp.91–99.
- UNIAN, 2016a. Fourth man who disappeared at Hrybovychi landfill is still missing. *UT Ukraine today*. Ucrania.
- UNIAN, 2016b. Lviv landfill problems expose trash recycling issues across Ukraine. *UT Ukraine today*. Ucrania.