

CONDICIONANTES GEOTÉCNICOS-AMBIENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS.

Juan Carlos Hernández del Pozo

Doctor Ingeniero de Caminos, Universidad de Granada.

Isidro Ocete Ruiz

Licenciado en Geología, Geotécnica del Sur. Area de Mecánica del Suelo y Cimentaciones.

Ramón García

Ingeniero de Caminos. DEA por la Universidad de Granada. Dirección General de Carreteras, Junta de Andalucía.

Juan Carlos Hernández Garvayo

Ingeniero de Caminos. DEA por la Universidad de Granada. Doctorando Universidad de Granada.

RESUMEN: En la actualidad, los vertederos de residuos sólidos urbanos se encuentran entre las obras de mayor difusión en todo el territorio nacional. Sin duda se trata de las actuaciones con mayor riesgo de afección de tipo ambiental. En general, el papel que tiene la geotecnia sobre estas afecciones ambientales es de extrema importancia, aunque no siempre ocupa el papel preponderante que le corresponde dentro del Proyecto de construcción.

La comunicación plantea, mediante una matriz de triple entrada, la evolución secuencial entre los tres conceptos que determinan la influencia de la geotecnia sobre la calidad ambiental, y definidos por Riesgo, Fragilidad y Calidad.

Inicialmente, los suelos se tratarán en función de su clasificación geotécnica y su influencia para presentar un potencial riesgo de inducir un mayor o menor riesgo de afección ambiental.

Medida desde el grado de fragilidad, nuestro trabajo se dirige a la consideración de este término expresado en función de los distintos factores de afección que presenta la Vulnerabilidad geotécnica, tales cual son: La definición geométrica, pendiente y altura, características geomecánicas de los materiales, etc.

Con este marco y como trabajo previo, nos hemos permitido una digresión intelectual previa a nuestro objetivo final, que hemos creído sería de interés para definir un modelo y que será constitutiva de una gradación geotécnica de cada uno de los términos clasificatorios de los diferentes suelos en función del riesgo de producir afecciones, la fragilidad de estas y la calidad, que definimos como “*calidad geotécnica-ambiental inicial*” de cada tipo o modelo geotécnico de suelos.

Este trabajo nace con una voluntad cierta de ser de aplicación, tomando como campo de estudio los trabajos realizados para la ubicación del Vertedero Municipal de Martos, en la provincia de Jaén.

I.- INTRODUCCION

En general la producción de residuos sólidos urbanos se ha doblado en el último quinquenio en nuestro país.

Un vertedero de tipo 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 biogás.

Las características y heterogeneidad de estos residuos, influyen en debilidades geotécnicas como alta compresibilidad, baja capacidad portante y débil estabilidad. Por ello, en la actualidad existe una

creciente participación de profesionales geotécnicos en las etapas de selección del emplazamiento, diseño, construcción, cierre, sellado y reinsertión de rellenos sanitarios.

Como ejemplo de la influencia que tiene el estudio de la geotecnia dentro de la construcción de residuos sólidos urbanos se ha tomado el desarrollo del vertedero municipal de Martos, en Jaén.

En una ciudad de tipo medio, como es Martos, el máximo de vertido que se puede prever es de aproximadamente 0.9 kg/hab/día.

En los próximos años los costos actuales 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 sostenido.

Estos antecedentes permiten deducir que se está en presencia de una obra de ingeniería de importantes costos, donde la geotecnia tiene una activa participación tanto en el proyecto, como en su ejecución, operación y rehabilitación.

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

II.- ANTECEDENTES

Las primeras referencias específicas sobre la relación entre la geotecnia y las ciencias ambientales, aplicadas a vertederos se encuentran en la década de los setenta, con la creación de un subcomité de la ASTM, con el título de "*Geotechnics of waste management*". El primer evento donde se trata más profundamente del tema es en el IX Congreso Internacional de la ISSMFE (Tokio, 1977), donde se dedicó a este tema una sesión especial. En el Congreso siguiente (Estocolmo, 1981), la dedicación crece al incluir como una de las sesiones la de "*Environmental Geotechnics*". Este interés aumenta en los congresos siguientes.

Actualmente, los principales avances sobre geotecnia de vertederos, son canalizados por el Comité Técnico TC 5 "Geotecnia Ambiental", de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), el cual fue creado el año 1994. Durante el 3er Congreso Internacional de Geotecnia Ambiental, realizado en Lisboa, en 1998, se presentó el estado del arte desagregado entre otros, en los siguientes temas: Sistemas de Monitoreo; Estabilidad de Residuos; Vertederos Sanitarios Controlados; Comportamiento de Vertederos Sanitarios bajo Condiciones de Carga Extremas.

III.- SITUACIÓN GEOGRÁFICA

El proyecto del vertedero de residuos sólidos urbanos que se ha tomado como ejemplo se desarrolla geográficamente en el término municipal de Martos, perteneciente a la provincia de Jaén.

La ciudad de Martos se encuentra a 24 Km. en dirección S.O. de la capital jiennense. Las coordenadas del núcleo urbano de Martos son 37° 43'20" de latitud Norte y 0°15'50" de longitud Este.

El término municipal de Martos tiene una extensión territorial de 259,1 Km². En el límite entre La

Campaña y Los Montes, la ciudad se encuentra emplazada al pie de la Peña homónima, que es la estribación final de la Sierra Mágina. La parte oeste y norte de su término forma parte de la Campiña Bética. Cabeza del mayor distrito olivarero español, el olivar cubre el 77% del territorio.



IV.- ENCUADRE GEOTÉCNICO DE LA CIUDAD DE MARTOS

Desde el punto de vista geológico, la localidad de Martos y sus alrededores se localiza en el sector septentrional de las Cordilleras Béticas, en el límite de las Zonas Externas con la Depresión del Guadalquivir. El Orógeno Bético representa el extremo occidental del conjunto de cadenas alpinas europeas. Se trata de una región inestable afectada durante gran parte del Neógeno por fenómenos tectónicos mayores.

Tradicionalmente se distinguen las Zonas Internas y las Zonas Externas, en comparación con cordilleras de desarrollo geosinclinal. En éstas se puede distinguir una parte intensamente deformada y metamorfizada (Interna), y otra que ha actuado de cobertera, y se encuentra plegada y, a veces, con estructuras de manto de corrimiento (Externa).

En el caso de las Béticas puede decirse que las Zonas Externas corresponden a un conjunto de sedimentos de edades comprendidas entre el Trías y el Terciario, que se depositaron en el margen meridional del Macizo Hespérico, en continuidad con la Cordillera Ibérica. Las Zonas Internas representan un bloque exótico, de evolución geológica ajena a la del Margen Ibérico.

Tradicionalmente la Zona Externa se han dividido en dos grandes Zonas: Prebético y Subbético, aunque algunos autores han distinguido una tercera más, Unidades Intermedias; como su propio nombre indica, paleogeográficamente se situaría entre las dos anteriores.

El Prebético es la zona más próxima a la costa y en él predominan los sedimentos asociados a medios marinos someros, e incluso continentales.

En función de las facies de los materiales del Cretácico y paleógeno, se divide en Externo e Interno, representando la primera zona los sectores más próximos a costas y la segunda las cercanas a áreas de cuenca abierta.

El subbético se sitúa en la actualidad al Sur del anterior y presenta facies pelágicas, más o menos profundas, durante gran parte del Jurásico y todo el Cretácico.

Basándonos en las características sedimentarias que reinaron durante el Jurásico, se divide en tres dominios: Externo, Medio e Interno (de Norte a Sur respectivamente).

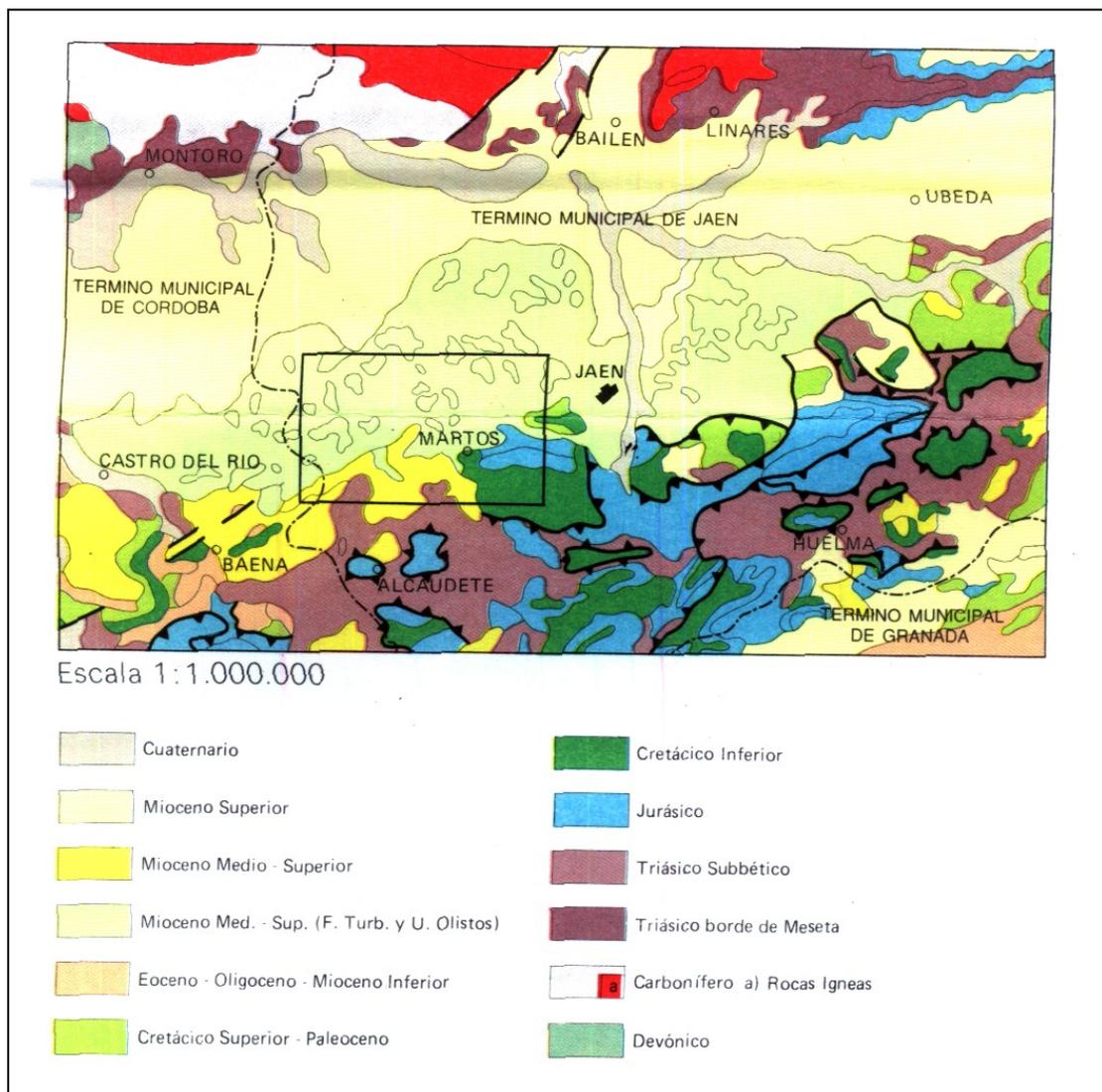
Tanto el Subbético Externo como el Interno representan sectores en los que se registró una pequeña subsidencia durante el Jurásico, siendo muy frecuentes las facies condensadas. El Subbético Medio se situaría entre los anteriores y en él se dio una notable tasa de sedimentación, con facies fundamentalmente margosa y emisión de rocas volcánicas.

La sedimentación en las Zonas Externas se continua hasta el Mioceno inferior registrándose tan sólo discordancia de carácter local.

Hacia el Mioceno inferior-medio colisionan las zonas Internas y Externas y se producen importantes cambios paleogeográficos, pudiéndose decir que la "Cuenca Bética" pierde su uniformidad.

En el Langhiense superior se desarrolla una tectónica transtensiva de componente OSO, que produce la fragmentación de la sZonas Externas en bloques y crea pronunciadas fosas entre ellas. Estas cuencas son rápidamente rellenadas por vertidos gravitacionales, de materiales poco consistentes (margas), desde los relieves adyacentes, y por importantes extrusiones de materiales triásicos. Una de las principales cuencas entonces creadas corresponden a la Depresión del Guadalquivir.

Como puede observarse en el esquema siguiente, la localidad jiennense se ubica, dentro de lo que se denomina depresiones postorogénicas, en el contacto entre dos tipos de unidades. Por un lado, la correspondiente a las series Prebéticas y que constituyen los relieves más pronunciados, y la otra, los materiales que pertenecen al Neógeno y Cuaternario y que dan las superficies más llanas y alomadas.



A partir de la cartografía de este sector (figura siguiente), pueden distinguirse los siguientes materiales que se comentarán desde los más antiguos a los más actuales y que afloran tanto en la localidad de Martos como en sus proximidades.

- Los materiales triásicos son los más antiguos, localizándose en pequeñas masas aisladas dentro de una formación caótica de edad neógena. Están constituidos por margas, arcillas y arenisca versicolores, encontrándose en general muy deformadas. El paquete en general consiste en una alternancia cíclica de margas, lutitas y areniscas, de tonalidades variadas, fundamentalmente rojo, verde y ocre. A veces hay pequeños niveles de yesos asociados a lutitas de tonos rojos.

- Los materiales jurásicos principalmente afloran en la Peña de Martos. Esta serie comienza con un conjunto calizo-dolomítico basal de aspecto masivo y se presenta bastante brechificado; en algunas ocasiones éstos aparecen con una estratificación difusa o bien tableados. Los procesos de dolomitización han borrado casi todos los rasgos estructurales iniciales, no obstante se han podido observar en ocasiones laminaciones paralelas.

Mediante un contacto irregular y a veces progresivo, sobre las dolomías se dispone un paquete de calizas de tonos blancos o beige. La estratificación de éstas es en estratos de unos 0.50 m de espesor, aunque en otros sectores puede ser difusa.

La potencia máxima observada en esta Peña es de algo más de 600 m.

Sobre este conjunto y mediante contacto erosivo se disponen unas brechas de matriz carbonatada de colores rojos y amarillentos. Los cantos son de calizas y dolomías liásicas, de calizas con sílex y de calizas nodulosas principalmente; generalmente son redondeados. En la secuencia de la Peña de Martos, aparecen importantes fenómenos erosivos que han eliminado los sedimentos de edad Lías superior – Dogger.

- Sobre los materiales anteriormente comentados, se han cartografiado los pertenecientes al Cretácico.

Estos están constituidos por margocalizas, margas y calizas de tonos amarillentos y grisáceos.

Presentan una potencia en las cercanías de Martos donde apenas supera los 200 m, mientras que hacia el Este pueden alcanzarse incluso los 1.000 m.

En general puede decirse que estos materiales se han depositado en un ambiente pelágico alejado de la costa y por debajo de la línea de acción del oleaje.

La secuencia cretácica continúa con unas margas ocreas grisáceas y escasos niveles de areniscas asociadas, que hacia techo, van ganando espesor y frecuencia.

Las areniscas son ricas en cuarzo y suelen presentar micas y restos carbonosos, siendo muy pobres en fragmentos de roca.

- A continuación aparecen cartografiados en este sector los materiales del Mioceno..

Se han distinguido tres unidades litoestratigráficas, que se han formado en un intervalo de tiempo diferente. Estas unidades son de muro a techo las siguientes:

- Unidad Olistostrómica
- Unidad de Castro del Río
- Unidad de Porcuna
- Formaciones detríticas

Unidad Olistostrómica: La litología se compone esencialmente de materiales de diversa naturaleza, como son arcillas y margas de colores variados, areniscas rojas, dolomías, yeso. Esta unidad está constituida principalmente por una mezcla caótica de dichos materiales donde se reconocen los Olistolitos.

Unidad de Castro del Río: Aunque dentro de ella se distinguen cuatro tipos de facies, la más representativa en el sector la constituyen las facies de margas blancas y limos margosos.

Unidad de Porcuna: Se pueden observar en una franja situada hacia el Oeste de Martos, entre el Cerro de la Atalaya y el Arroyo de la fuente.

La litología dominante corresponde a una margas de tonalidades ocreas a amarillentas, grises en corte fresco, en las que son frecuentes las pasadas arenolimosas.

Estos materiales representan los últimos sedimentos marinos asociados a la Depresión del Guadalquivir.

Las formaciones detríticas están formadas por secuencias cíclicas de conglomerados con niveles de limos de tonalidades claras hacia la base y rosada en el resto.

La naturaleza de los cantos es principalmente calcárea, aunque también hay de calcarenitas, margocalizas, etc.

- Los materiales cartografiados más recientes pertenecen a las formaciones cuaternarias, cuyas formas principales están asociadas a procesos fluviales.

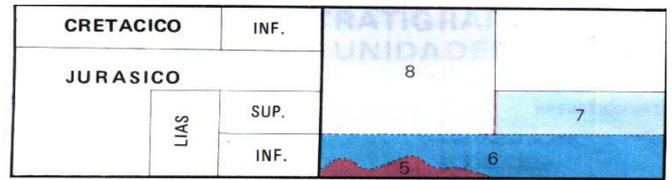
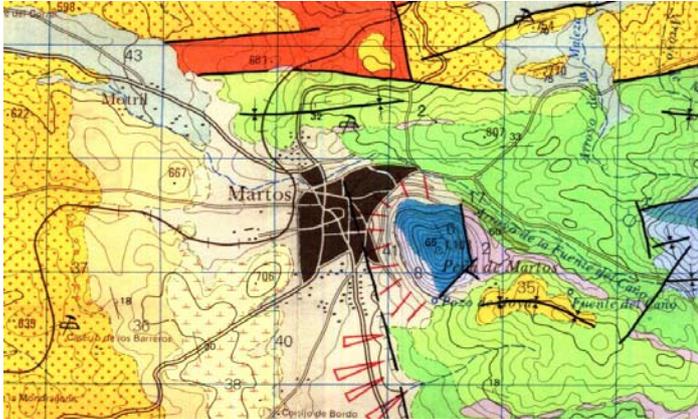
Glacis: Corresponden a unos sedimentos conglomeráticos de abundante matriz limo-arcillosa rojiza, cuya superficie suele estar tapizada por delgadas costras calcáreas. Se localizan en la mitad occidental de la población de Martos.

Derrubios de laderas: Corresponden a cantos angulosos o subangulosos de naturaleza calcárea, que se encuentran embutidos en una matriz limo-arcillosa roja. Se observan en la mitad oriental de localidad ocupando las cotas más bajas de la Peña de Martos.

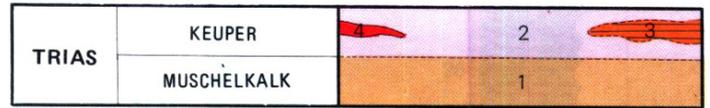
Aluvial y relleno coluvial: Constituyen los depósitos actuales ligados a los cursos fluviales (aluvial). Además aquellos otros que tapizan las partes bajas de las vertientes de los cursos poco encajados (coluvial).

Los aluviales tienen una litología de gravas, arenas y limos, mientras que los depósitos coluviales corresponden a cantos con arcillas.

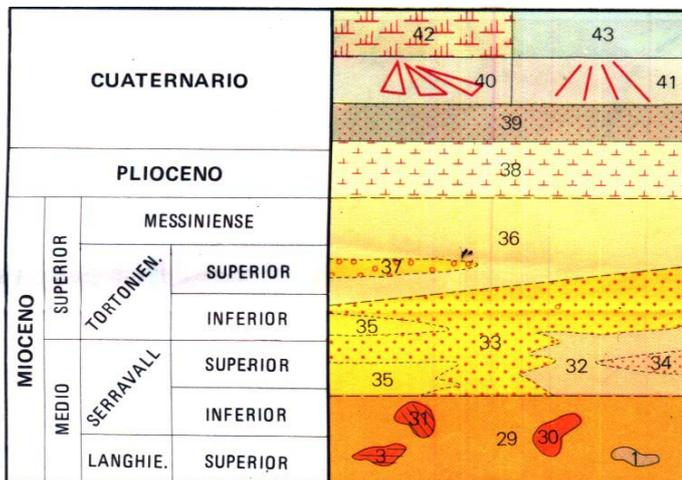
Éstos han sido cartografiados a lo largo de la carretera que une las localidades de Martos e Higuera de Calatrava, en las inmediaciones de la primera población.



- 8 Brechas (Peña de Martos).
- 7 Margas y calizas margosas grises.
- 6 Calizas micríticas y oolíticas.
- 5 Dolomias.



- 4 Rocas básicas.
- 3 Yesos.
- 2 Margas, arcillas y areniscas versicolores.
- 1 Dolomias.



- 43 Aluvial o relleno coluvial.
- 42 Fondos de valle.
- 41 Derrubios de ladera.
- 40 Glacis (coluvial).
- 39 Terrazas, aluviales.
- 38 Conglomerados de matriz limo-arcillosa, de color rojo.
- 37 Calcarenitas.
- 36 Margas limosas de color crema.
- 35 Calcarenitas, areniscas calcáreas y conglomerados. Localmente calizas de algas.
- 34 Areniscas y areniscas calcáreas de carácter turbidítico.
- 33 Unidad detrítico-carbonatada, facies de margas blancas y limos margosos.
- 32 U. detrit-carb. facies turbidíticas.
- 31 Olistolitos de calizas del Prebético.
- 30 Olistolitos de edad Cretácico-Terciario indiferenciados.
- 29 Unidad Olistostrómica.

V.- HIDROGEOLOGÍA

Desde el punto de vista hidrogeológico, las únicas formaciones que se comportan como permeables dentro del sector, y con posibilidad de construir acuíferos, son los carbonatos del Subbético, Unidades Intermedias y Mioceno Medio y los sedimentos detríticos neógenos y cuaternarios.

De ellos sólo presentan afloramientos, los suficientemente extensos como para tener cierto interés hidrogeológico, las calizas y dolomías del Lías inferior y Dogger de la Sierra La Grana-Jabalruz, y ya más alejado, las calizas prebéticas del E de Torre del Campo.

En cuanto al primero, en la secuencia monoclin al jurásica, buzante al Sur, que aflora desde Jabalruz a las proximidades de Martos, aparece un tramo de 150 a 300 metros de potencia, formado por calizas con sílex del Dogger, que constituye el acuífero denominado Dogger del Jabalruz.

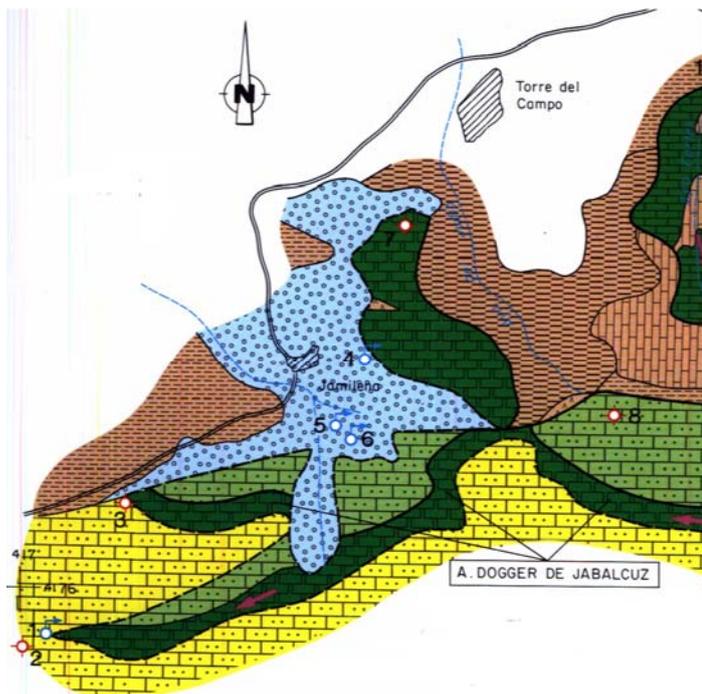
Estos materiales permeables afloran en una superficie de 5 Km² y se disponen sobre materiales, de baja permeabilidad del Lías superior, constituidos por calizas margosas y calizas tableadas. Hacia el Sur el acuífero se introduce bajo margas, margocalizas y turbiditas calcáreas del Malm, que llegan a producir su confinamiento.

La única descarga natural visible corresponde al manantial de La Maleza, situado a una cota de 850 msnm, manantial que se encuentra regulado por el sondeo de abastecimiento a Martos y que denota un flujo subterráneo principal hacia el Oeste. Dentro del acuífero existen pequeños sectores desconectados del mismo, tales como el sector noroccidental, donde se

encuentra el sondeo de abastecimiento a Jamilena, con los niveles situados por debajo de la cota de surgencia del La Maleza (820 msnm).

La infiltración de las precipitaciones constituye la principal alimentación y se estima en 1.25 hm³/año. Las descargas anuales cuantificadas, corresponden a las que se producen a través del manantial de La Maleza (0.25 hm³/año) y su sondeo de regulación (1 hm³/año).

En el siguiente gráfico se muestra la distribución de los materiales que constituyen el acuífero del Dogger del Jabalcuz, numerado el manantial de La Maleza con el n° 1 y la surgencia como n°2.



-  Coluvial, glacia, aluvial (Cuaternario)
-  Margas y arcillas (Mioceno)
-  Margas, arcillas y brechas. U. Olitostromicas (Paleoceno-Mioceno)
-  Calizas y calizas nodulosas (Cretácico Superior)
-  Margocalizas, calizas y margas (Cretácico Inferior)
-  Calizas, calizas margosas y margocalizas (Lias Superior-Malm)
-  Dolomías y calizas (Lias Inferior-Dogger)
-  Arcillas versicolores (Trias Keuper)

VI.-VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad de los diferentes terrenos hace referencia al riesgo de afección a las aguas subterráneas por actividades contaminantes, en función de su distinto comportamiento hidrogeológico.

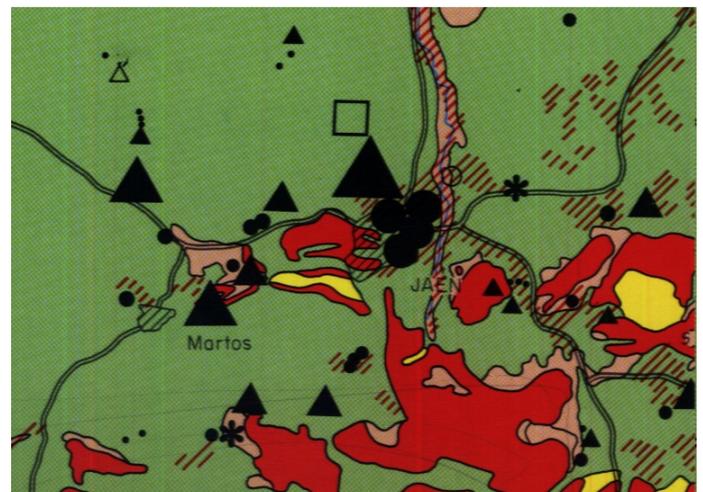
En el mapa adjunto, obtenido a partir del mapa hidrogeológico, se distinguen cartográficamente con un código de colores, los grados de vulnerabilidad frente a la contaminación.

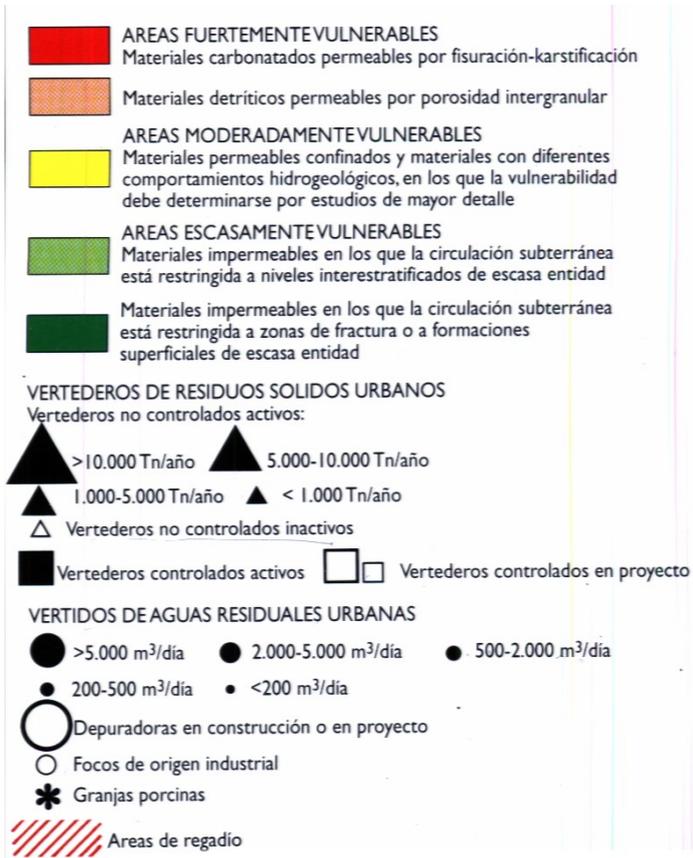
Las áreas consideradas fuertemente vulnerables corresponden a los afloramientos de formaciones acuíferas. Entre éstas se han distinguido las situadas sobre acuíferos de naturaleza carbonatada, en los que la circulación de agua subterránea es debida principalmente a la karstificación/fisuración de los materiales, y los de naturaleza detrítica, con permeabilidad por porosidad intergranular.

En los primeros el riesgo de contaminación es relativamente más elevado, debido a la mayor rapidez de circulación del agua subterránea y a la escasa capacidad de autodepuración de los materiales carbonatados.

Las formaciones en las que la karstificación está más desarrollada son las que presentan velocidad de propagación más elevada de los agentes contaminantes, y or tanto las que suponen un mayor riesgo. Corresponden principalmente a las calizas del Jurásico inferior de los dominios subbético y prebético, y a las dolomías y calizas de Cretácico superior prebético.

En los acuíferos detríticos la circulación subterránea es más lenta, con los que la desintegración y oxidación de los contaminantes de naturaleza orgánica es más eficaz. Por otra parte, la presencia abundante de materiales arcillosos permite la retención de gran parte de los metales mediante procesos de intercambio iónico. No obstante, la capacidad de autodepuración de estos acuíferos está condicionada por sus características granulométricas y en especial, por el espesor de la granja no saturada.





VII.- CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS

Los principales rasgos geomorfológicos tienen como base las características y comportamiento de las diferentes familias de rocas ante las condiciones ambientales.

Como se muestra en el siguiente mapa, tanto la localidad de Martos como sus alrededores, se han subdividido en áreas (marcadas con n° romano y subíndice) que presentan unas determinadas características geomorfológicas. Los diferentes tonos marrones marcan la topografía existente; mientras que el rayado verde da muestras del grado de estabilidad de la zona.

La mayor parte de la población presenta una morfología prácticamente ausente de relieve, con superficies totalmente llanas y pendientes topográficas casi siempre inferiores al 3% y nunca superiores al 7%. La aparición de fenómenos geomorfológicos es reducida, siendo nula en cuanto se refiere a los de tipo endógenos y muy reducidas en cuanto a los exógenos. La estabilidad de sus terrenos es elevada y únicamente se puede ver afectada en aquellos sectores que tiendan a producir taludes importantes, donde la poca cementación de sus materiales los predispone al deslizamiento o desmoronamiento.

Hacia el Este, presenta una morfología que abarca todas las formas de relieve, con pendientes topográficas que van del 5 al 30%.

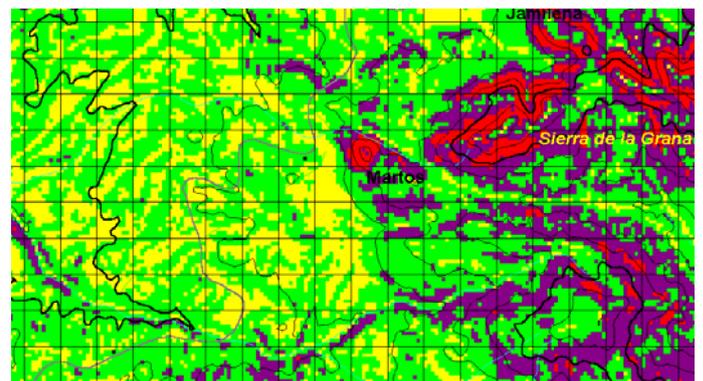
En general sus materiales presentan gran estabilidad natural, exceptuando algunas partes que pueden presentarse con mayor pendiente.

Hacia el Norte presenta una morfología que oscila entre llana y alomada, con pendientes que oscilan entre el 7 y el 15%.

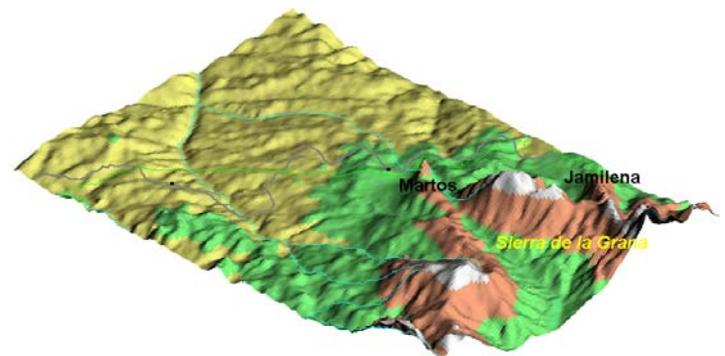
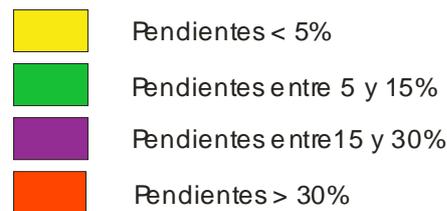
Las características geomorfológicas presentan un marcado carácter de desfavorabilidad. En general la estabilidad de sus terrenos es muy precaria, factor que se acentúa en cuanto se realizan obras sobre los mismos. A grandes rasgos pueden observarse en casi todas las laderas deslizamientos (activos en muchos puntos) y pequeños hundimientos a lo largo de las superficies llanas.

Por ello, es necesario realizar en todas las obras que se efectúen en este sector, una serie de estudios encaminados a determinar el comportamiento del lecho margoso y así poder prever, y prevenir en parte, su posterior comportamiento.

VIII.- PENDIENTES Y RELIEVE DE LA ZONA



LEYENDA



IX.- CLIMATOLOGIA

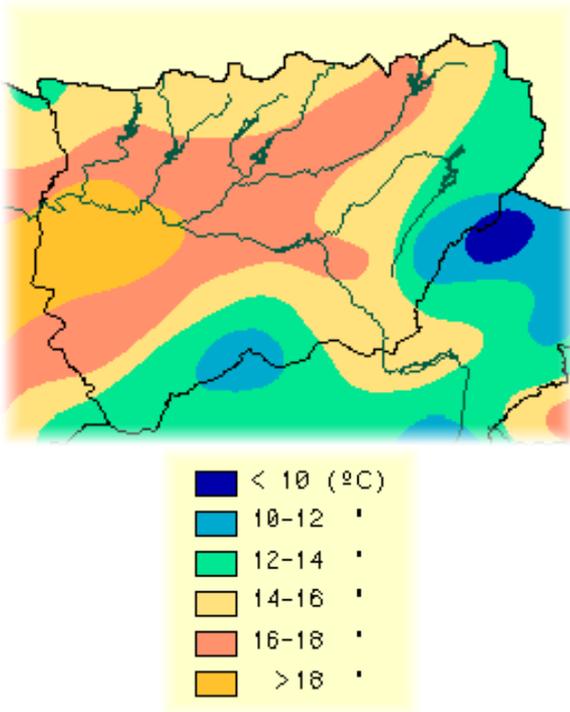
Dentro de este apartado se describirán algunos parámetros climáticos y meteorológicos tales como temperaturas, precipitaciones o vientos dominantes, de forma general, que afectan tanto a la localidad de Martos como a sus alrededores.

Temperaturas

Las temperaturas medias anuales oscilan desde 13 °C y 18 °C, estando las máximas absolutas comprendidas entre 39 °C y 44 °C, mientras que las mínimas se acercaron a los -10 °C.

Las temperaturas medias mensuales se mantuvieron por encima de los 13 °C, para alcanzar una media máxima mensual de 28 °C en el mes de Julio.

El periodo de las heladas se extiende desde Octubre a Marzo.



Temperaturas medias anuales

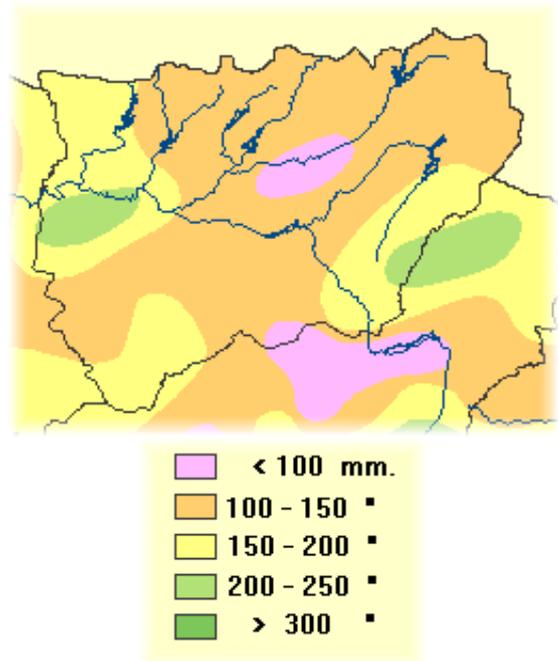
Precipitaciones

En general el valor medio de las de las precipitaciones varía entre 700 y 500 mm.

Las precipitaciones máximas en 24 h varían desde 11.5 y 13 mm. en los meses de Julio y Agosto, hasta un máximo de 119 mm en el mes de Febrero.

La humedad relativa media mensual oscila desde el 49% en el mes de Julio, hasta el 81% en Diciembre.

En cuanto a las precipitaciones nievadas, no suele darse en la zona excepto a cotas más superiores de los macizos montañosos.



Precipitaciones máximas diarias

Vientos dominantes

Los vientos en general varían según las zonas, no obstante, puede decirse que son sensiblemente paralelas a los macizos montañosos, dominando la dirección E-O.

X.- HIDROLOGÍA

Las características hidrológicas estarán basadas en la distinta permeabilidad de los materiales y en sus condiciones de drenaje.

La mayor parte de la población y la franja que se extiende por la carretera hacia Santiago de Calatrava y hacia Fuensanta de Martos, los materiales pueden considerarse semipermeables, cuyo drenaje, efectuado por percolación natural, se considera aceptable.

Es normal la existencia en profundidad de un nivel acuífero definido y continuo, a cotas que si bien normalmente no afectan las bases de obras de cimentación de reducida importancia, si puede afectar a aquellas que precisen alcanzar grandes profundidades.

Hacia la parte oriental de la población marteña, los materiales que constituyen esta zona, se consideran impermeables, admitiendo en grande, y no siempre, una cierta permeabilidad ligada a su grado de fracturación.

El drenaje, debido a la acusada morfología que predomina, oscila entre aceptable y favorable, debido, el primero a percolación por fisura y escorrentía y el segundo por escorrentía muy activa.

XI.- CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES

El objetivo de este apartado consiste en la descripción de la naturaleza de los materiales que forman el área estudiada.

Posteriormente y con el fin de identificar los suelos afectados, se han tomado un total de seis muestras en superficie a las que se les han realizado los siguientes ensayos:

- Granulometrías
- Límites de Atterberg
- Reconocimiento de sulfatos solubles en suelo

En primer lugar se ha establecido la clasificación de los suelos, apoyándonos en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Este sistema de clasificación es una consecuencia del Sistema de Clasificación para Aeropistas desarrollado por A. Casagrande, como un método rápido para identificar y agrupar los suelos para construcciones.

A partir del ensayo realizado de granulometría y límite de Atterberg, los niveles identificados están formados por:

un suelo de grano fino, con material fino de media y alta plasticidad, clasificado como:

- Arcillas inorgánicas de baja plasticidad (CL)
- Arcillas inorgánicas de media y alta plasticidad (CH)

A continuación se representarán los valores para cada una de las muestras:

MUEST.	CLASIF	GRANULOMETRIA	
		Paso 200	Paso 4
M-1	CH	93.48	100
M-2	CL	76.29	96.96
M-3	CL	64.18	97.84
M-4	CH	87.47	99.55
M-5	CL	51.78	98.27
M-6	CL	69.31	95.19

MUEST.	CLASIF	LIMITES ATTERBERG	
		L. Líquido	I. Plasticidad
M-1	CH	53.40	27.64
M-2	CL	33.04	17.38
M-3	CL	39.42	15.40
M-4	CH	56.08	28.44
M-5	CL	35.66	19.66
M-6	CL	28.33	13.15

En conjunto esta capa se puede definir como un material fino, constituido por arcillas, de tonos cremas verdosas, donde se pueden observar intercalaciones de materiales arenosos.

En algunas ocasiones estas intercalaciones arenosas tienen una entidad considerable, llegando a estar incluso cementadas formando un conglomerado.

Como puede observarse a partir de los datos de clasificación, presentan una plasticidad en algunos casos elevada.

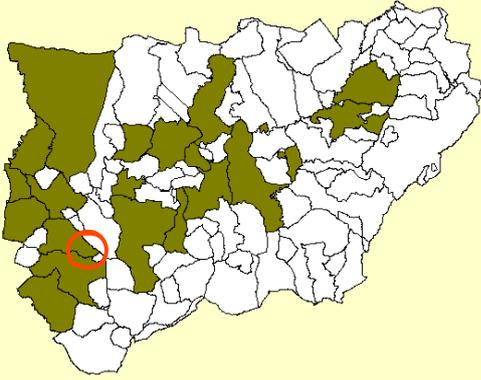
En cuanto al contenido en sulfatos, se ha detectado en dos de las muestras analizadas, por lo que es necesario tener en cuenta las siguientes recomendaciones con el hormigón de la cimentación.

- Tipo de cemento Resistente a Sulfatos
- Relación máxima agua/cemento 0.50
- Contenido mínimo de cemento 300 Kg/m³

XII.- LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MARTOS

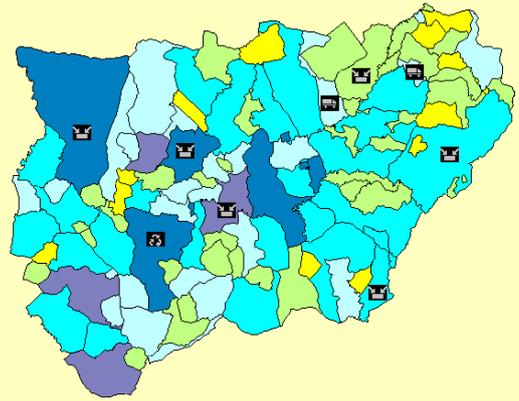
Las características de los residuos sólidos en el estudio para el vertedero de referencia se detallan en los siguientes gráficos:

JAEN
MUNICIPIOS CON EMISIONES INDUSTRIALES INVENTARIADAS



Municipios con emisiones industriales inventariadas.

PRODUCCION DE RESIDUOS (Tm/Año)

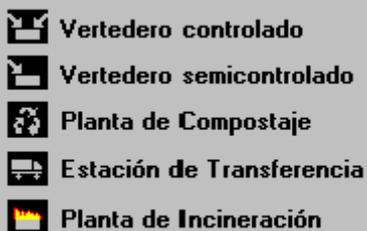
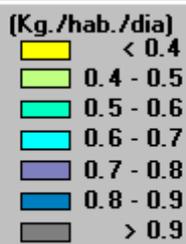
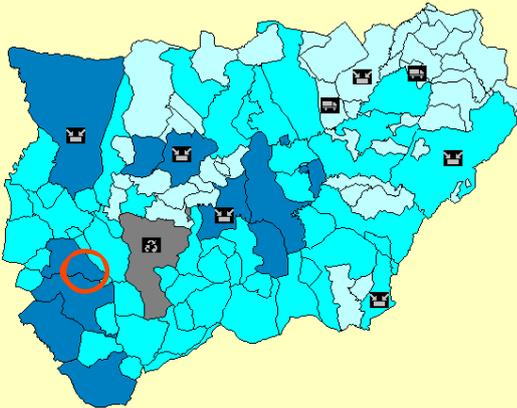


[Tm/Año]



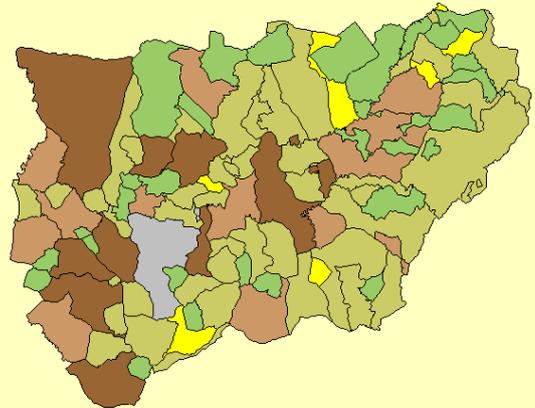
Producción de residuos (Tn/año)

COEFICIENTE GENERACION DE RESIDUOS (Kg./Hab./Día)



Coeficiente de generación de residuos (kg/hab./día)

NUMERO DE CENTROS SUSCEPTIBLES GENERAR RTP



Número de centros susceptibles de general residuos tóxicos y peligrosos.

XIII.- SELECCIÓN DEL TIPO DE EMPLAZAMIENTO

En la etapa de Selección del emplazamiento de un vertedero sanitario, el sitio debe ser diseñado y manejado de manera que las sustancias nocivas no contaminen en cantidades inaceptables (de acuerdo con regulaciones apropiadas), además de impedir que se produzca una afección no deseada o inaceptable sobre la salud humana, o el medio ambiente.

Para evaluar la idoneidad de un sitio se requiere contar, entre otros, con los siguientes antecedentes:

- Reconocimiento de la distribución de las aguas freáticas, vías de flujos y barreras (acuíferos y acuiclusos), sus propiedades hidráulicas y el potencial de mejoramiento del efecto sellante del subsuelo.
- Información acerca de la disponibilidad y calidad de materiales para cobertura, su facilidad para la excavación.
- Reconocimiento de la composición geológica local y general
- Reconocimiento de las características morfológicas y estructura tectónica
- Riesgos de peligros naturales
- La composición física y química, propiedades y secuencia de los estratos
- La distribución de los estratos, continuidad lateral y vertical.
- El comportamiento esfuerzo deformacional del subsuelo

Una participación activa como hemos visto, le corresponde a la geotécnica en el **conocimiento del régimen de las aguas freáticas**, dado que el agua es el vehículo más activo de difusión de contaminantes en el terreno y por lo tanto es fundamental proteger las aguas limpias para evitar su alteración con otras contaminadas. Por lo tanto, es preciso conocer durante las etapas iniciales del proyecto, adicionalmente a los aspectos ya señalados:

- 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, con máximos y mínimos valores (al agua y lixiviados)
- La distribución, espesores y profundidad de los acuíferos y acuiclusos.
- Características químicas de las aguas freáticas; datos pluviométricos; superficie de escorrentía, niveles de percolación, entre otras.
- Adicionalmente a los antecedentes señalados, se requieren otros para el diseño y operación del vertedero, entre los que se destacan:

- Previsiones sobre los materiales a ser empleados como cobertura en el vertedero. Información acerca de la facilidad para su excavación y disponibilidad de préstamos, calidad de este suelo de cobertura disponible y el 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, la estabilidad de los taludes naturales o artificiales, riesgo deformacional del suelo, riesgo de colapso y fenómenos geológicos activos o reactivables.

- 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 en vertederos, particularmente en lugares de topografía accidentada, donde es necesario recurrir a diseños que cuentan con taludes importantes.

Atendiendo a todos estos criterios se optó por la ubicación de dicho vertedero a las afueras de la localidad de Martos, junto al denominado Cortijo El Chinche.

La iniciativa para la realización de este vertedero surge ante la demanda que presenta el municipio de Martos de un lugar que permita la recogida controlada de residuos inertes, motivada por el gran número de construcciones tanto civiles como industriales que se están produciendo, debidas al crecimiento que esta localidad está presentando en los últimos años.

Este sector se localiza en una zona deprimida entre dos vaguadas, ocupando el lecho del río. Su situación al estar a las afueras del municipio y lejos de cualquier vía principal de comunicación va a reducir en gran medida el impacto visual que pueda producir el mismo en el paisaje.

Con la ejecución del proyecto quedarían resueltos los problemas de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Martos, para lo cual se realiza un estudio hidrológico de la zona con el fin de conocer el comportamiento del agua en las vaguadas que lo van a circundar, y así poder prever soluciones que permitan un correcto drenaje a través del vertedero sin perjuicio del cauce existente.

La zona en estudio presenta un relieve de lomas suaves propio de la comarca de Jaén, morfología habitual en terrenos de naturaleza arcillosa, en donde predomina el cultivo del olivo.

Dicho relieve permite que el agua de escorrentía adquiera velocidades no muy grandes por lo que el poder de erosión en la zona es pequeño, pero no por ello poco importante en épocas de avenidas como se ha podido apreciar en las visitas de los técnicos a la zona, ya que aunque el relieve en los alrededores es relativamente suave éste tiende hacia terrenos más escarpados a medida que confluyen los ríos, zona ésta donde se va a ubicar el vertedero.

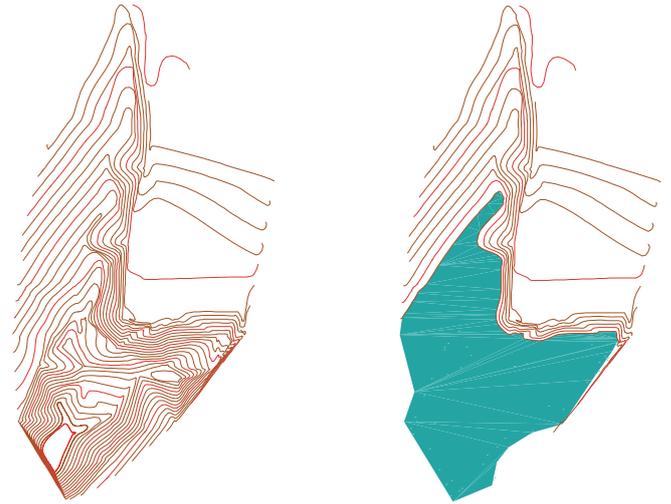
En la confluencia de las vaguadas que recogen el agua superficial de las zonas alomadas, el cauce se abre favoreciendo por tanto la disminución de la erosión del agua que discurre, aunque el agua ha ido originando un cauce principal en el centro, produciendo procesos de socavación sobre los materiales más favorables para ello.

En dicho cauce, donde se pretende ubicar el vaso del vertedero, aparece vegetación riparia propia de zonas húmedas, además de arbustos de la familia de los Quercus, vegetación distribuida de forma desigual a lo largo del lecho del río.



Este altiplano servirá como plataforma de vertido, permitiendo desde su coronación la entrada y vaciado de las bañeras de residuos inertes procedentes del municipio, para posteriormente comenzar con el extendido y compactación de los residuos. Antes de estos trabajos, en el vaso del vertedero que se pretende sea el lecho del río, sería necesario la limpieza y tratamiento del mismo, así como su estudio detallado para la continuidad del agua superficial a través del vertedero, sin que éste pueda suponer una barrera para la circulación del agua de escorrentía así como un peligro en la calidad aguas abajo.

La evolución de la vida útil del vertedero pasaría de la cota 475 m en su parte inferior a 494 m en su coronación, por lo que presentaría un desnivel de unos 19 metros aguas abajo, con una superficie ocupada de aproximadamente 11.657 m².



Situación inicial y final del vertedero

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 es admisible la contaminación de aguas o suelos que ocasiona el vertedero, se debe disponer una **barrera impermeable** que ejerza esa función. Las barreras deben evitar también la infiltración de aguas 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 hasta 10^{-12} m/s a 10^{-14} m/s. La permeabilidad del suelo disminuye con estabilizaciones, 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 muy bajas, pero debido a sus características deben ser dispuestas en conjunto con suelo compactado y/o mejorado.

El TC 5 de la ISSMGE define entre los antecedentes mas importantes que se debería tratar de obtener de los residuos, para el diseño a: la humedad, densidad,

porcentaje de materia orgánica, permeabilidad resistencia al corte, compresibilidad, deformabilidad, capacidad de soporte desde la velocidad de propagación de ondas. Se reconoce la dificultad que tiene obtener estos parámetros a través de ensayos no tradicionales y la interpretación de los resultados.

Otra importante participación de la geotécnica en los vertederos es la que se refiere a la **estimación de la compresibilidad**. Ello porque 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 del vertedero en su fase de rehabilitación. El ritmo de producción de los asientos en un vertedero es variable con la edad, presentando velocidades que disminuyen con el tiempo, pero que en todo caso se mantienen perceptibles durante años. Se ha podido comprobar que vertederos con alto contenido de residuos orgánicos, los asientos son importantes durante los primeros 10 años.

Los primeros estudios sobre compresibilidad de vertederos datan de la década de 1940 en Estados Unidos, aunque las primeras publicaciones son de los años 70.

La compresibilidad y en general el comportamiento mecánico de un vertedero controlado está afectado por múltiples factores, siendo los principales:

- Composición, características de las basuras y espesor de la celda en el relleno.
- Humedad del residuo, capacidad de campo del relleno.
- Tipo y metodología de rellenos empleada; equipo usado en la operación de compactación y densidades alcanzadas por residuos y material de cobertura.
- Tipo y espesor del material de cobertura, relacionados con la evolución de la T° y humedad, entre otros factores, que influyen en el proceso de descomposición.
- Condiciones climáticas, tanto de pluviometría, como temperaturas ambientales
- Edad del vertedero, condición fundamental en la estabilidad de este.

Una forma típica de abordar la reproducción del proceso de compresibilidad en vertederos, es la utilización de experiencias de comportamientos semejantes en Geotecnia, siendo varios los autores que utilizan teorías semejantes a los estudios de suelos naturales. Ejemplo de ello es el planteamiento propuesto por Sowers (1973), quien establece que los asientos iniciales 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
- σ_{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, se inician los asientos producto de cambios físico químicos, degradación biológica y compresión mecánica secundaria. Ellos tienen un comportamiento más o menos lineal con el logaritmo del tiempo, similar a la compresión secundaria de suelos y se determinan mediante la expresión de la teoría de la consolidación secundaria:

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

Donde:

- S_s = asiento durante la consolidación secundaria al tiempo t_2
- H = altura de la celda al tiempo t_1
- C_α = 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

La obtención del coeficiente de compresibilidad (C_c) y del índice de compresión secundaria (C_α) se hace a partir de la relación de estos parámetros con el índice de poros (e_0) en los gráficos propuestos por Sowers (1973) en la figura 1. Estos parámetros han sido contrastados por diversas experiencias, arrojando adecuadas correlaciones. Este criterio ha sido el más empleado hasta ahora en Iberoamérica para predecir los asientos en un relleno sanitario.

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 ha concluido la vida útil del relleno.

Un problema práctico importante, es la dificultad para obtener muestras representativas de los materiales para los estudios, y la falta de métodos de ensayos universalmente aceptados y contrastados por la comunidad científica. Por lo tanto, los métodos que se emplean habitualmente se deben interpretar con cautela y evaluando la aplicabilidad de las correlaciones utilizadas en el estudio de suelos a los residuos.

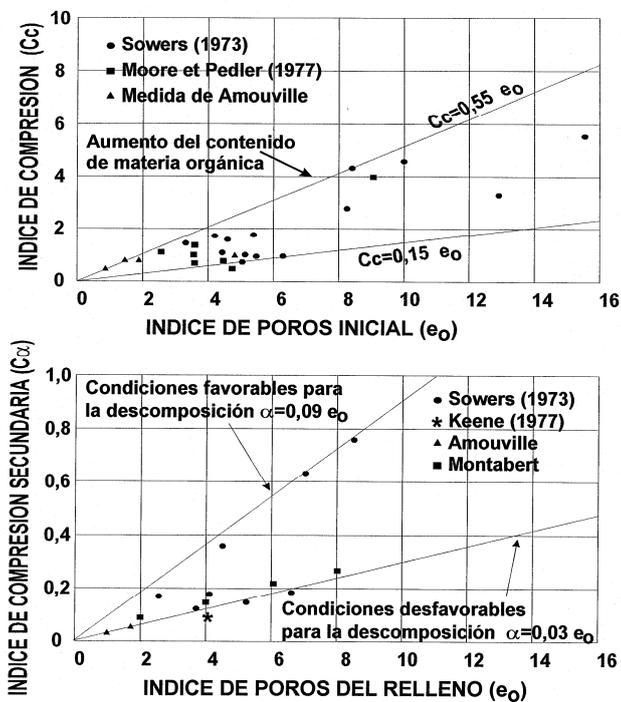


FIGURA 1. Parámetros deformacionales para rellenos sanitarios (Sowers, 1973)

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. Souza y Rodríguez (1980) estudiaron la compresibilidad de un vertedero, considerando la forma de disposición de las basuras. 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 se depositaba la basura al pie del talud, compactando en tongadas con la misma maquinaria. Los asientos medidos con ambos sistemas disminuyeron 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.

Bookter 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 asientos.

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 al modelo propuesto por Sowers (1973) y han sido empleadas en varios diseños de vertederos en el mundo.

Así mismo Landva y Clark (1990), recomiendan el empleo de rellenos de prueba para evaluar la compresibilidad de los vertederos. Estos ensayos son muy eficaces, mientras que los ensayos geotécnicos convencionales de laboratorio, generalmente no son aplicables para rellenos de basuras, principalmente por el tamaño y heterogeneidad de los materiales.

En la U. Católica de Valparaíso (UCV) también se han realizado experiencias para obtener parámetros de diseño durante las etapas de operación de los vertederos El Molle de Valparaíso y Limache de la V Región (Espinace et al.1989). Las investigaciones en este último vertedero sanitario de baja densidad midieron asientos de alrededor del 30% de la altura inicial al cabo de 7 años. Estos valores coinciden con los obtenidos en otros vertederos de Chile, tales como "La Feria" o "Lo Errazuriz" en Santiago (Espinace et al, 1991) y los expuestos por Hinkle(1990).

Entre los modelos para el estudio de asientos, destacan la ley exponencial propuesta por Gandolla (1992), y el modelo Meruelo (Arias,1994),(Palma,1995). Este modelo es uno de los más avanzados actualmente y ha sido desarrollado en España, entre la Universidades Católica de Valparaíso y de Cantabria. Es el único modelo que considera en su planteamiento inicial y en su formulación, los fenómenos de degradación de la materia orgánica como causantes de los asientos secundarios no debidos a sobrecargas externas. Los parámetros fundamentales considerados son el tiempo, el contenido de materia orgánica en los residuos, la humedad y el ritmo de desarrollo de los procesos de degradación, entre otros.

Para el desarrollo del modelo de predicción de asientos se considera el proceso con un inicio definido, aplicado a una masa de material degradable también definida, existente en el instante inicial, sin aportes adicionales de masa una vez que el proceso de degradación ha comenzado. El modelo incluye los aportes de masa que se producen durante la operación. Este planteamiento implica que para un período de tiempo prolongado, la materia orgánica biodegradable debería desaparecer en su totalidad. Sin embargo, se considera que una parte de los RSU no son orgánicos y no sufren degradación y por otra no toda la materia orgánica se degrada.

Actualmente, en la U.C.V. se desarrollan investigaciones iniciadas en 1996, que estudian la velocidad de estabilización y la modelación de los asientos registrados en experiencias a nivel de laboratorio y en un vertedero experimental a escala real. Se ha comparado el caso de vertederos operando con recirculación de lixiviados tratados en un digestor anaerobio, con el caso en que no existe ningún proceso de recirculación, empleando residuos sólidos representativos de país (Espinace et al 1997). A los asientos medidos, se han ajustado los modelos de Sowers y de Meruelo; se ha obtenido los parámetros para cada caso y se ha realizado una predicción de los asientos esperados. Los modelos geotécnicos utilizados se ajustan a las medidas reales y los parámetros obtenidos, permiten predecir los asentamientos que ocurrirán. Además se estudia la reducción en los tiempos de estabilización de la degradación de los residuos sólidos. Los resultados preliminares obtenidos del análisis de los asientos, indican que la recirculación de lixiviados tratados en un digestor anaerobio, provoca un aumento efectivo en los asentamientos de los rellenos de residuos

sólidos. La causa del incremento de asientos no parece estar en un aumento de la actividad biológica, asociada a procesos de degradación, sino que parece estar en fenómenos de colapso del relleno, provocados por la adición de líquido a tasas que causan cambios a nivel estructural. Un indicador de la baja actividad biológica registrada en las experiencias, es la reducida producción de biogas en los rellenos, que se verificó durante la investigación, aunque en los digestores anaerobios utilizados para depurar los lixiviados, se registró una buena producción de biogas.

Otro tema de alto interés es **la capacidad de soporte de los vertederos sanitarios**. Ella, en general es reducida y dependerá de factores como espesor del suelo de cobertura, composición de los residuos sólidos, 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).

Según este autor la capacidad de soporte está entre 0,25 y 0,40 kg/cm², advirtiéndose que los ensayos de placa de carga con placas pequeñas pueden ocasionar impresiones equivocadas en la capacidad de soporte de un relleno. Para Cartier y Baldit (1983) la capacidad portante está entre 0,25 y 1 kg/cm².

El CEDEX de España, plantea que las investigaciones realizadas hasta la fecha, indican que los RSU compactados tienen un comportamiento muy dúctil y no presentan una tensión de rotura determinada, sino que en la mayoría de los casos, se agota la capacidad de deformación de los sistemas de ensayo sin llegar a alcanzarse un valor de tensión constante. Por lo tanto, no es fácil definir valores de parámetros resistentes en rotura y hay que adoptar otros criterios como establecer límites en las deformaciones.

El comportamiento mecánico de los RSU ha sido comparado al de la "tierra armada" debido al efecto de los elementos fibrosos que se entrecruzan

actuando como un refuerzo del material. Es por esta razón que únicamente se describen roturas con planos de cizalla a través de este tipo de materiales en casos de zonas especialmente debilitadas o debidas a pérdida de estabilidad por efecto del agua. En este sentido, se puede asumir que los residuos son materiales compuestos consistentes en una "matriz básica" que comprende las partículas medias y finas, más semejante a un suelo y cuyo comportamiento es friccional y en una "matriz reforzada".

Entre las experiencias desarrolladas en terreno, 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 este autor 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. 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 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 $2,00 \text{ kg/cm}^2$, 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. En esta investigación también se estudió el comportamiento de una edificación experimental de 30 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.C.V. realiza desde 1989 el seguimiento del comportamiento de una vivienda experimental de 16 m^2 , 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. Esta experiencia se detalla mas adelante.

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 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 periodo 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 si 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 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. Los métodos más utilizados para la estabilización de taludes de RSU son Bishop y el de desplazamientos traslacionales, en una primera fase y de talud infinito en su etapa final y clausura.. 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 parámetros de diseño, adicional a los ensayos de laboratorio, como edómetros de gran diámetro; de terreno como ensayos placa de carga, ensayos a escala real, prospecciones geofísicas o ensayos de penetración tipo SPT o CPT, es realizar cálculos "a posteriori" (back-analysis) a partir de campos de prueba y registros operacionales. La figura 2 muestra un resumen realizado por Palma(1995) de parámetros resistentes obtenidos desde diferentes fuentes.

Uno de los más recientes aportes a este tema es el de Hirata, T et al.(1995), los que 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 que la teoría de Mohr-Coulomb puede no ser adecuada teniendo en cuenta que los residuos sufren grandes deformaciones sin llegar a rotura y la incompatibilidad entre los esfuerzos con deformación que producen rotura por corte en suelos y aquellos que producen rotura por corte en residuos. Esto indica que los análisis de estabilidad de vertederos de residuos está relacionada más con asientos y capacidad de soporte de la cimentación que con la rotura de talud. Este criterio es similar al planteado anteriormente por el CEDEX.

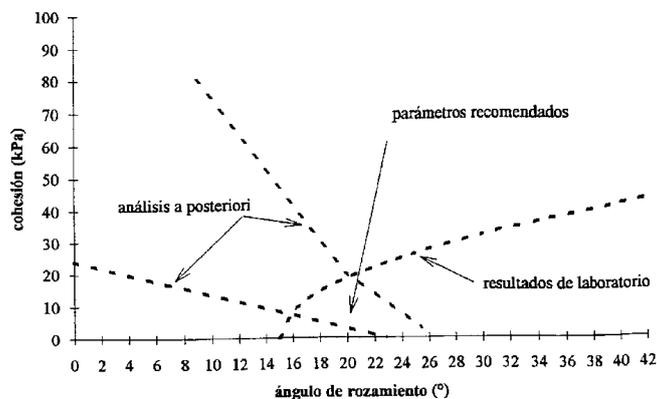


FIGURA 2. Parámetros resistentes en rellenos sanitarios (Palma, 1995)

TENDENCIAS ACTUALES

Se ha señalado que durante los últimos años, la Geotecnia Ambiental ha tenido una creciente participación en los proyectos de diseño, operación y rehabilitación de vertederos y en la construcción sobre estos. Es claro que en los próximos años esta participación irá en aumento, sobretodo considerando los resguardos técnicos y medioambientales que se requerirán a futuro.

Recientes tragedias provocadas por deslizamientos dejan de manifiesto la importancia del papel de la geotecnia en estas obras. Las mas reciente es el alud de basura que dejó mas de 40 muertos en un poblado de Manila en Filipinas en el mes de Julio del 2000. Allí, un gigantesco basural se derrumbó y enterró un grupo de precarias viviendas y sepultó unas 100 casas debido a las intensas lluvias provocadas por el tifón Kai-Tak. En el poblado de precarias viviendas viven más de 60.000 personas, que en su mayoría obtienen el sustento vendiendo objetos que rescatan de la basura. El vertedero absorbe un cuarto de las 4.500 toneladas de basura que producen cada día los habitantes de Manila, una ciudad con 10 millones de habitantes.

Por otra parte, importantes lecciones geotécnicas dejó el deslizamiento ocurrido el 27 de Septiembre de 1997 en el vertedero Doña Juana de Colombia, donde la masa deslizada cubrió aproximadamente 10 hectáreas y los desechos llenaron varios cientos de metros de un Río cercano a un área poblada.

Allí, en el análisis de estabilidad se asumió que la basura sólida tenía un ángulo de fricción efectivo de 28° , una cohesión efectiva de $2,5 \text{ t/m}^2$, y un peso unitario total de $1,2 \text{ t/m}^3$. Los análisis de estabilidad fueron realizados presumiendo superficies de falla circulares, (método de Bishop); y superficie de fallas translacionales (método de Janbu). Los diseños preliminares indicaban que para un mecanismo de falla circular el factor de seguridad oscilaba entre 1,4 y 1,5. Para el mecanismo de falla deslizante por traslación, la superficie de deslizamientos 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. Los resultados indican que el ángulo de fricción en la superficie de deslizamiento para un FS calculado de 1,0 fue de 22° , valor aproximadamente igual a la resistencia máxima de interfaz entre un material de

geomembrana liso y el material granular de recolección de lixiviado.

El motivo principal de la falla se debe a que los lixiviados generados en el relleno no pudieron ser drenados adecuadamente y por consiguiente se empezaron a acumular desde el comienzo de la operación. Ello 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, haciendo subir la posición del nivel de la superficie libre y 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. Estas presiones de gases disminuyeron aún mas 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 igualmente una disminución con el tiempo 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.

Los aspectos del diseño, operación y construcción que pudieron causar las excesivas "presiones de poros" fueron: 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.

Esta experiencia demuestra que 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. La operación de un Relleno Sanitario es algo de mucho cuidado, no es solamente colocar basura siguiendo un diseño,

sino también analizar las fisuras, los caudales de todos los efluentes, los análisis físicos y químicos, las cantidades de basura que se colocan, entre otros, para prevenir desastres. El insuficiente desarrollo de la ingeniería práctica en estos aspectos exige el establecimiento de medidas preventivas durante la operación del relleno, especialmente cuando se incluye un proceso relativamente nuevo como la recirculación de lixiviados.

Es fundamental en estos casos contar con medidas preventivas y de control durante la operación del relleno, como por ejemplo: instrumentar los Rellenos Sanitarios con piezómetros, inclinómetros y redes topográficas, para controlar, los movimientos de estas grandes masas; sistemas de control entre los lixiviados producidos y recolectados que permitan determinar la acumulación de líquido en el relleno y la factibilidad de la recirculación de estos; elementos de medición de presiones internas dentro del relleno en áreas críticas; elementos de presión de gases dentro del relleno que permitan establecer las modificaciones necesarias en el sistema de alivio; un programa de Seguridad Geotécnica que permita establecer la importancia de cada uno de los factores enunciados anteriormente. En los estudios de Impacto Ambiental se debe incluir, como factor importante, el análisis de la estabilidad de los taludes.

Como medidas de precaución para evitar este tipo de fallas geotécnicas se debe tener presente que en la actualidad todos los Rellenos Sanitarios, recientes o antiguos están saturados o próximos a la saturación y por tanto deben ser drenados a corto plazo. Además todas las lagunas existentes sobre la masa de la basura deben ser secadas. Para evitar posibles fallas donde el principal motivo es el aumento de la presión intersticial, es indispensable que se cuente con sistemas de drenaje interno de los líquidos y secundariamente de los gases. Se recomienda, entre otros, la ejecución de trincheras, galerías de drenaje y drenes horizontales de alivio.

Por otra parte, en algunos antiguos vertederos donde se han realizado proyectos de reinserción después de varios años de abandono, la participación geotécnica ha consistido principalmente en el reconocimiento del subsuelo generalmente mediante calicatas y ensayos de penetración dinámica; la caracterización de los materiales a través de ensayos de laboratorio; la estimación de la deformabilidad principalmente aplicando los modelos planteados por Sowers (1973), y últimamente modelos de tipo exponencial. La capacidad portante se ha estudiado

principalmente a través de ensayos de placa de carga, ensayos de carga en canchas de prueba, y el seguimiento del comportamiento de estructuras experimentales. El análisis de la estabilidad de taludes tanto en condiciones drenadas como no drenadas, se ha realizado principalmente mediante back analysis.

Se ha podido comprobar que la alternativa de construir, sobre estos terrenos es factible siempre que se cuente con los estudios previos necesarios y se consideren los resguardos aquí mencionados. Se mantiene la incertidumbre de cual será el comportamiento de las estructuras construidas en países con importantes ante eventos sísmicos, los que no se han presentado en la zona central de Chile en los últimos 15 años.

El Comité Técnico TC 5 de la ISSMGE cuenta con un subcomité (SC 9) dedicado al estudio del comportamiento de los vertederos sanitarios ante condiciones de carga extrema, como los terremotos. Entre los mecanismos de falla que se recomienda emplear se mencionan: deslizamientos, distorsiones de corte de vertederos o suelo de fundación; rotura del suelo de cobertura; rotura de los taludes internos del vertedero; fallas en el sistema de recolección del gas; roturas en las geomembranas; roturas en el vertedero por fallas en el suelo de fundación; movimientos tectónicos del subsuelo; licuefacción del vertedero o suelo de fundación. Este Comité recomienda emplear aceleraciones de diseño de 0.2 g para dar seguridad al comportamiento del vertedero sanitario. Este valor podría ser aún insuficiente en países de alta sismicidad.

Es claro que el conocimiento actual sobre la conducta geotécnica en vertederos sanitarios es aún insuficiente y se requieren mayores investigaciones sobre el tema. De igual forma, el comportamiento de los vertederos sanitarios durante un terremoto, deberá ser motivo de futuras investigaciones, mediante el análisis de métodos experimentales y matemáticos.

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..
- Cartier, G., y Baldit, R., (1983) "Comportement Géotechnique des Déscharges de Residus Urbains".

Bull. Liaison, Lab. C. 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, N°77, Edición Octubre, Noviembre y Diciembre de 1990, Madrid, España.

- Espinace, R. Diaz, 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.

- **Espinace R., Caffarena J., Palma J. (1999) "Patologías en Construcciones Sobre Areas Impactadas por el Vertido de Residuos Sólidos". V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones, Montevideo, Uruguay.**

- 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 título U.C.V., Chile.

- 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.