



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio hidrológico, geológico y geotécnico para la
construcción de un vertedero de residuos inertes en la
localidad de Andorra (Teruel)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Jaramillo Cabezas, Daniel Stiven

Tutor/a: Torrijo Echarri, Francisco Javier

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Estudio hidrológico, geológico y geotécnico para la construcción de un vertedero de residuos inertes en la localidad de Andorra (Teruel)

**Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil**

AUTOR/A: Jaramillo Cabezas, Daniel Stiven

Tutor/a: Torrijo Echarri, Francisco Javier

CURSO ACADÉMICO:24/25



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio hidrológico, geológico y geotécnico para la
construcción de un vertedero de residuos inertes en la
localidad de Andorra (Teruel)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

AUTOR/A: Jaramillo Cabezas, Daniel Stiven

Tutor/a: Torrijo Echarri, Francisco Javier

CURSO ACADÉMICO:

Contenido

1. ANTECEDENTES.	3
2. OBJETIVO DEL PROYECTO.....	3
3. DESCRIPCION DE LA OBRA PROYECTADA Y DE LA PARCELA ESTUDIADA	4
3.1. Emplazamiento y superficie.	5
3.2. Capacidad y vida útil.	5
3.3. Tipología de residuos admitidos.....	6
3.4. Obra civil principal: vaso de vertido	6
3.5 Características diferenciales del emplazamiento	7
4. ENCUADRE TOPOGRÁFICO Y GEOLÓGICO	7
4.1 Mapa topográfico.	8
4.2 Marco geológico general.....	9
4.3 Mapa geológico de España 1:200.000 hoja 494 y LEYENDA	12
4.4 Geomorfología	13
4.5 Climatología	15
4.5.1 Riesgos climatológicos.	18
4.6 Estudio hidrológico.....	18
4.7 Sismicidad.....	21
5. PERFIL LITOLÓGICO DEL TERRENO.....	24
5.1. Implicaciones geotécnicas e hidrogeológicas:	27
5.2. Ensayo Lefranc	28
6. NIVEL FREÁTICO.....	32
6.1. Observaciones durante la campaña.....	32
6.2. Interpretación hidrogeológica	32
6.3. Implicaciones para el proyecto	33
6.4. valoración crítica	33
7. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES.	34
7.1. Muestra M-1: Gravas limo-arenosas.	34
7.2. Muestra M-2: Gravas limosas.....	36
7.3. Muestra M-3: Arcillas de baja plasticidad.	38
8. CUMPLIMIENTO NORMATIVO.....	41
9. ANÁLISIS DE RIESGOS.	42
9.1. Marco normativo y metodológico	42
9.2. Metodología aplicada.....	42

9.3. Identificación y evaluación de riesgos.....	43
9.3.1. Riesgos geológicos y geotécnicos	43
9.3.2. Riesgos hidrológicos e hidrogeológicos	46
9.3.3. Riesgos sísmicos y de inestabilidad dinámica	48
9.4 Matriz-resumen de riesgo (Andorra, Teruel)	50
9.5. Valoración	51
10. ESTUDIO DE SOLUCIONES.....	52
10.1. Criterios de diseño (anclas normativas).....	52
10.2. Soluciones de impermeabilización del vaso y flancos.	53
10.3. Soluciones de drenaje de lixiviados.....	55
10.4. Soluciones de gestión de aguas pluviales	55
10.5. Estabilidad de taludes y control de erosión.....	57
11. CONCLUSIÓN	59
12. CONSIDERACIONES DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	61
Bibliografía	63
ANEJOS	64
ANEJO I CROQUIS Y SITUACIÓN	65
ANEJO II ENSAYOS	67
ANEJO III. TRABAJOS DE CAMPO, UBICACIÓN DE CALICATAS Y SONDEOS.....	89
.....	115

1. ANTECEDENTES.

RECICLADOS DEL PIRINEO S.A., encarga a IGEO-2, s.l., la realización de un estudio

hidrogeológico en una parcela donde se pretende construir un vertedero de residuos inertes.

Dicha parcela se ubica en el término municipal de Andorra (Teruel). Para la realización del presente informe se han llevado a cabo un total de cuatro sondeos mecánicos y una calicata, así como una visita técnica por medio de geólogos especializados y la toma de muestra de los diferentes niveles para su posterior ensayo en el laboratorio. Se hace llegar al personal del Departamento de Geología y Geotecnia de IGEO-2, s.l., la siguiente documentación para la ejecución del proyecto geotécnico:

- Planos en planta de la parcela.
- Documentación diversa, relacionada con el proyecto.

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

El presente trabajo tiene como finalidad ofrecer al promotor y al equipo proyectista una caracterización completa y precisa del terreno ubicado en la parcela objeto de estudio, con el propósito de evaluar su idoneidad para la construcción de un vertedero de residuos inertes. Para ello, se estudian los materiales del subsuelo, su permeabilidad, nivel freático, estratigrafía, estabilidad y respuesta ante acciones externas (precipitaciones, filtraciones, etc.).

Los resultados permitirán comprobar si el emplazamiento cumple con las condiciones exigidas por la legislación medioambiental vigente, en especial en lo relativo a la protección del suelo y de las aguas subterráneas como a su vez diferentes soluciones para la aceptación del mismo.

El estudio incluye también una descripción detallada del contexto geológico de la zona, con el fin de anticipar el comportamiento del terreno frente a posibles procesos de infiltración. La información obtenida permitirá determinar si las características del terreno se ajustan a los criterios establecidos en el Real Decreto 646/2020, que regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, constituyendo así una base técnica sólida para la toma de decisiones en el desarrollo del proyecto.

3. DESCRIPCION DE LA OBRA PROYECTADA Y DE LA PARCELA ESTUDIADA

La parcela a estudio se localiza en el término municipal de Andorra (Teruel)

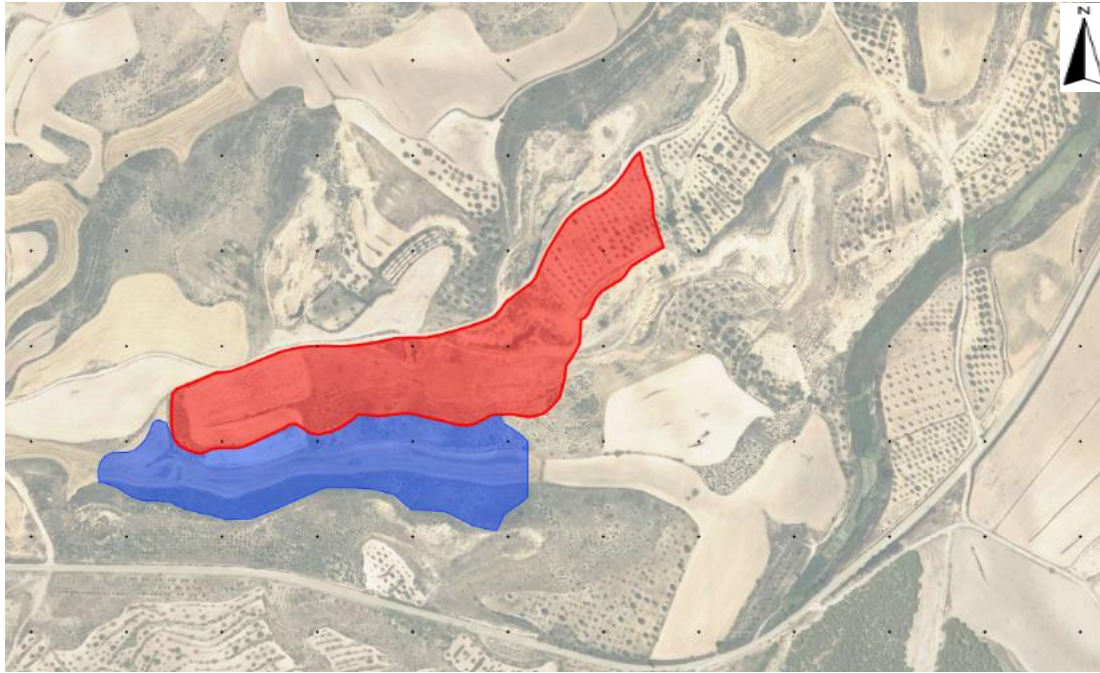


Figura 1. Situación Ortofoto de la zona a estudiar para vertedero, zona azul

3.1. Emplazamiento y superficie.

El vertedero de residuos inertes proyectado se ubicará en el término municipal de Andorra (Teruel), en una parcela de uso agrícola situada en las afueras del núcleo urbano, lo que garantiza la distancia mínima exigida por la normativa respecto a zonas habitadas y reduce la afección directa a la población. La altitud media del emplazamiento es de aproximadamente 700 metros sobre el nivel del mar, dentro de un contexto de topografía suavemente inclinada hacia el sur, lo que facilita la evacuación natural de las aguas pluviales y la integración de los sistemas de drenaje proyectados. La superficie destinada al vertedero comprende unas 6 a 8 hectáreas, lo que permite disponer no solo del vaso de vertido, sino también de infraestructuras auxiliares, balsas de pluviales, instalaciones técnicas y accesos.

Respecto a la elección del emplazamiento, el terreno resulta favorable porque combina accesibilidad y seguridad hidrogeológica. Por un lado, está suficientemente próximo a los principales núcleos de generación de residuos de la comarca, lo que reduce los costes y emisiones asociadas al transporte. Por otro, se encuentra fuera de zonas inundables según el SNCZI y no presenta condicionantes geológicos desfavorables, lo que constituye una ventaja fundamental frente a otras posibles ubicaciones. A nivel local, la elección de un espacio agrícola degradado tiene también una justificación social, ya que evita ocupar suelos de mayor valor ecológico o urbanístico. En conjunto, el emplazamiento responde tanto a criterios técnicos como a principios de sostenibilidad territorial.

3.2. Capacidad y vida útil.

La capacidad de un vertedero es un parámetro esencial para su diseño, ya que condiciona tanto las dimensiones del vaso como la planificación operativa y la vida útil de la instalación. En este caso, se ha previsto una capacidad total de entre 2 millones de metros cúbicos, lo que, considerando las tasas anuales de generación de residuos inertes en la comarca, supone una vida útil estimada de 10 a 15 años. Esta previsión no es arbitraria, sino que se fundamenta en los datos de generación de residuos de construcción y demolición (RCD) proporcionados por el Gobierno de Aragón.

3.3. Tipología de residuos admitidos.

El vertedero admitirá exclusivamente residuos de tipo inerte, en concordancia con lo establecido en el Real Decreto 646/2020 y en la Decisión de la Comisión 2003/33/CE relativa a criterios de admisión en vertederos. Entre los residuos autorizados se incluyen: tierras y piedras no contaminadas, residuos de construcción como hormigón, ladrillos, cerámicos y tejas, y materiales de demolición que no presenten componentes peligrosos ni susceptibles de generar lixiviados contaminantes.

Quedan expresamente excluidos los residuos urbanos mezclados, los residuos peligrosos y aquellos que puedan sufrir transformaciones químicas, físicas o biológicas que comprometan la seguridad de la instalación. Esta restricción asegura que el vertedero mantenga un bajo riesgo ambiental, dado que los residuos inertes no producen gases ni lixiviados agresivos. El diseño de la instalación responde, por tanto, a las especificaciones técnicas requeridas para este tipo de residuos, simplificando los sistemas de impermeabilización y control en comparación con vertederos de residuos no peligrosos o peligrosos.

Desde un análisis técnico, limitar el vertedero a residuos inertes es una decisión acertada, ya que simplifica los sistemas de control y reduce notablemente los riesgos ambientales. En Andorra, el sector de la construcción y las actividades extractivas generan cantidades relevantes de este tipo de residuos, por lo que el proyecto responde a una necesidad real del territorio. Además, excluir residuos peligrosos o con potencial contaminante es clave para mantener la confianza de la población local y de la administración.

3.4. Obra civil principal: vaso de vertido

El vaso de vertido constituye la estructura fundamental del proyecto y su diseño se ha realizado conforme a los criterios del RD 646/2020 y la guía técnica del MITERD (2023). El fondo del vaso se excavará y regularizará con una pendiente mínima del 2 % para facilitar el drenaje hacia los sistemas de recogida de lixiviados. La impermeabilización se proyecta como un sistema compuesto formado por:

- Una barrera mineral de arcilla compactada con espesor $\geq 1,0$ m, finos > 30 %, índice de plasticidad entre 10–30 y compactación ≥ 95 % Proctor Modificado.
- Una barrera artificial mediante geomembrana de PEAD de espesor ≥ 2 mm o geosintético bentonítico (GCL), como refuerzo adicional.
- Una capa drenante de 30–50 cm constituida por geocompuesto o gravas lavadas, que integra tuberías ranuradas de HDPE para la recogida y conducción de lixiviados hacia pozos de bombeo o balsas específicas.

Este diseño garantiza que la conductividad hidráulica del conjunto sea muy inferior al límite de 1×10^{-7} m/s exigido por la normativa, incluso teniendo en cuenta la heterogeneidad detectada en los niveles superficiales durante la campaña de investigación geotécnica. De esta manera, se asegura la protección de los recursos hídricos y la seguridad ambiental de la instalación

3.5 Características diferenciales del emplazamiento

El emplazamiento de Andorra presenta una serie de condiciones geológicas, hidrogeológicas y ambientales que lo diferencian positivamente frente a otras posibles ubicaciones. Los materiales predominantes son margas y arcillas compactas, con coeficientes de permeabilidad del orden de 10^{-7} – 10^{-8} m/s en profundidad, lo que constituye una barrera natural frente a la migración de contaminantes. Además, no se ha identificado nivel freático libre hasta los 15 metros de profundidad, lo cual refuerza la seguridad hidrogeológica del emplazamiento.

Desde el punto de vista hidrológico, el área se encuentra fuera de zonas inundables según el SNCZI, y en términos sísmicos, la peligrosidad es baja con una aceleración sísmica básica inferior a 0,04 g, de acuerdo con la NCSE-02. Asimismo, el terreno seleccionado se sitúa en una zona agrícola de bajo valor ecológico, lo que reduce el impacto sobre hábitats de interés. Estas características diferenciales hacen que el emplazamiento cumpla holgadamente los criterios técnicos y ambientales requeridos para vertederos de residuos inertes, ofreciendo un alto grado de seguridad y fiabilidad a largo plazo.

4. ENCUADRE TOPOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

En este apartado se presenta una síntesis geológica del entorno que abarca un área más extensa que la correspondiente a la parcela objeto de estudio. Este enfoque permite contextualizar geológicamente el emplazamiento, ofreciendo una visión global de las características litológicas y estructurales del área, fundamentales para valorar su idoneidad como vertedero de residuos inertes

4.1 Mapa topográfico.

La parcela objeto del estudio, situada en el término municipal de Andorra (Teruel), dentro de la comarca de Andorra-Sierra de Arcos, presenta una topografía suavemente ondulada, con cotas comprendidas entre los 700 y 740 metros sobre el nivel del mar. Esta morfología relativamente uniforme constituye una ventaja para el proyecto, ya que reduce la magnitud de los movimientos de tierras necesarios para la ejecución del vaso de vertido y facilita el diseño de los sistemas de drenaje superficial y de acceso. Las pendientes moderadas permiten evacuar las aguas pluviales hacia los sistemas perimetrales sin riesgo de acumulaciones excesivas, lo que resulta favorable en el contexto de un clima caracterizado por lluvias torrenciales e irregulares.

En cuanto a la cobertura vegetal, la parcela presenta escasa vegetación natural y se encuentra mayoritariamente ocupada por usos agrícolas o industriales. Este factor es relevante porque implica una baja sensibilidad ecológica del entorno, reduciendo el impacto ambiental derivado de la implantación del vertedero. A diferencia de otras zonas con mayor biodiversidad o presencia de hábitats protegidos, aquí la transformación del suelo no supone una pérdida significativa de valor ecológico. Además, esta condición facilita la futura integración paisajística del vertedero mediante programas de revegetación con especies autóctonas al finalizar la vida útil de la instalación.

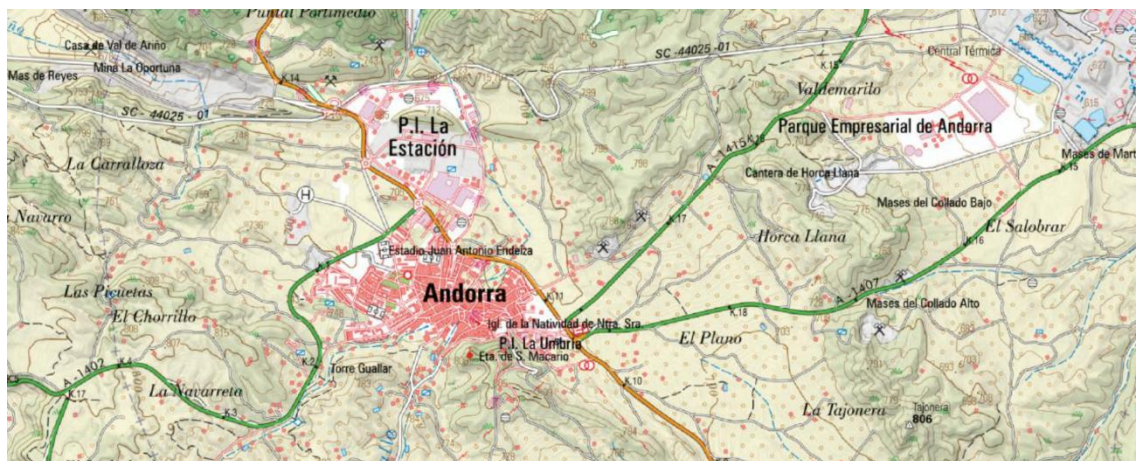


Figura 2. Topografía de la zona

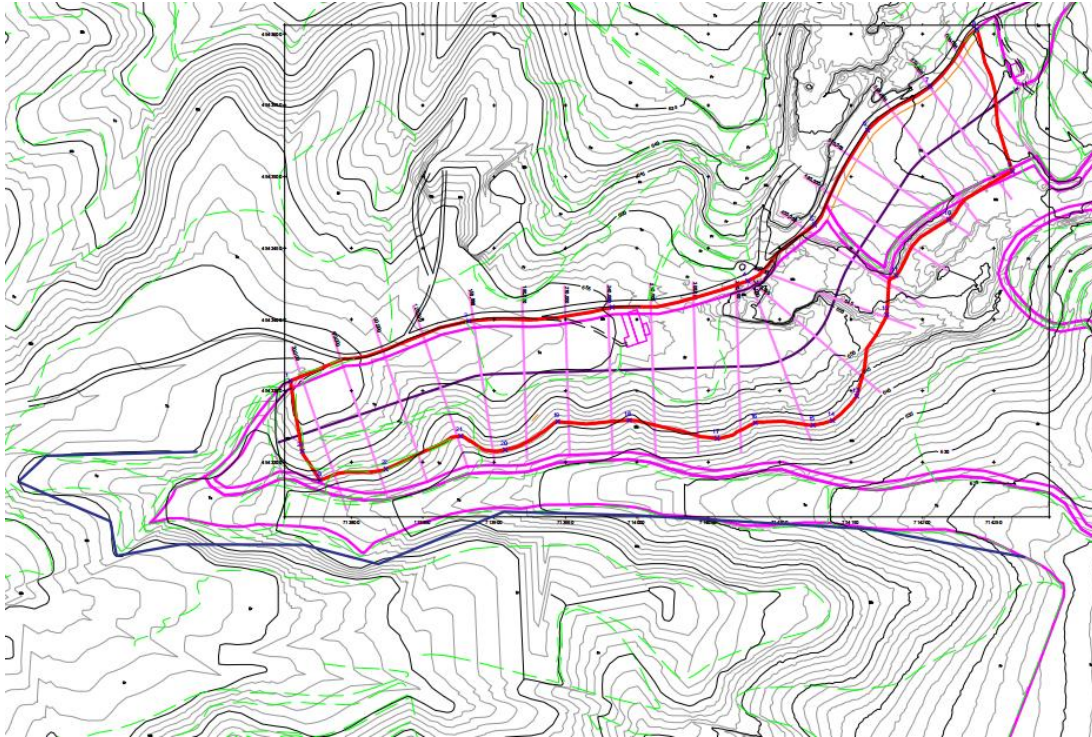


Figura 3. Topografía de la zona, zona limitada por línea azul.

En síntesis, las condiciones geomorfológicas y ambientales del emplazamiento aportan factores positivos para la viabilidad del vertedero. La topografía suave simplifica el diseño y la construcción; el clima semiárido limita la generación de lixiviados, aunque exige sistemas de control de escorrentía robustos; y el bajo valor ecológico del terreno reduce la afección ambiental. De este modo, el emplazamiento puede considerarse adecuado desde el punto de vista físico y territorial para albergar un vertedero de residuos inertes.

4.2 Marco geológico general.

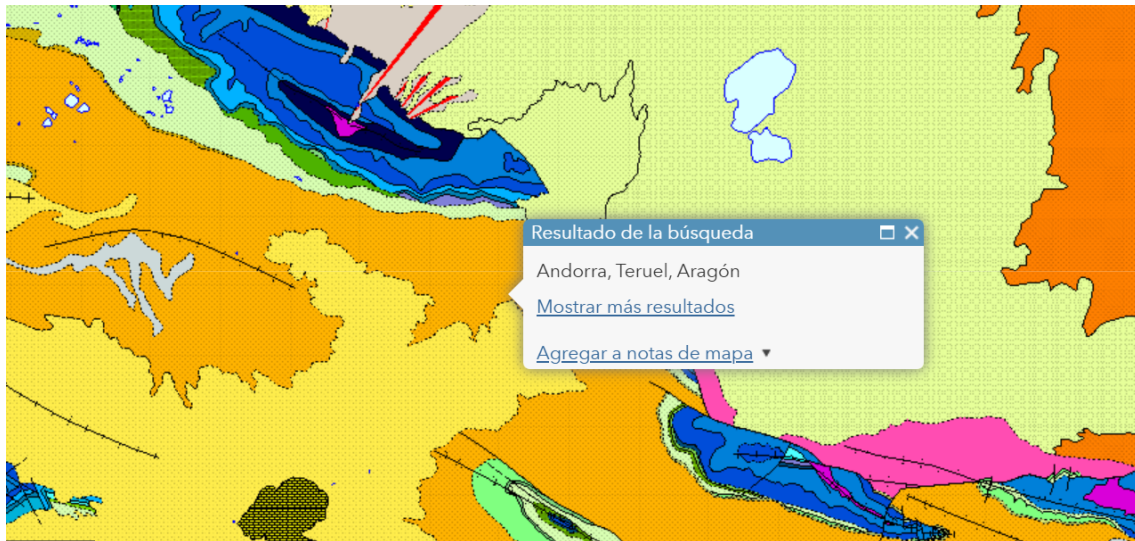
La caracterización geológica del área de estudio se ha realizado a partir de la memoria de la Hoja Geológica de Calanda 494 a escala 1:50.000 del IGME, dado que no existen estudios específicos publicados sobre el término municipal de Andorra (Teruel). Según dicha cartografía, el substrato geológico de la zona está constituido mayoritariamente por depósitos de edad Terciaria (Mioceno), formados por arcillas, areniscas, conglomerados y calizas, que rellenan las depresiones estructurales relacionadas con las cuencas del Ebro,

Calatayud-Montalbán y Calamocha-Teruel. Estos materiales corresponden a las formaciones sedimentarias que se generaron durante la Orogenia Alpina, cuando los procesos de deformación de la corteza asociados a la elevación de los Pirineos provocaron la acumulación progresiva de sedimentos clásticos y carbonatados en las cuencas subsidentes del entorno.

Estratigráficamente, se distinguen dos grandes unidades litológicas. En primer lugar, los materiales de edad Terciaria, constituidos por secuencias detríticas y carbonatadas, donde se alternan niveles arcillosos y margosos de baja permeabilidad con intercalaciones de areniscas y conglomerados más permeables. Estas secuencias, con buzamientos suaves y disposición subhorizontal, configuran el basamento sedimentario sobre el que se emplaza la zona de estudio. En segundo lugar, sobre estos materiales aparecen depósitos de edad Cuaternaria, de origen aluvial y coluvial, vinculados a la dinámica actual y reciente de los sistemas fluviales y de ladera. Estos depósitos son discontinuos y se caracterizan por su mayor heterogeneidad granulométrica.

Un rasgo destacado del área, señalado en la hoja geológica, es la presencia de formaciones evaporíticas, entre las que se incluye la halita (cloruro sódico) y la epsomita (sulfato de magnesio). La formación de halita se presenta con espesores variables y un alto grado de deformación tectónica, consecuencia de los ambientes sedimentarios evaporíticos desarrollados en condiciones de aridez y alta evaporación. Por su parte, la epsomita recubre parcialmente a los materiales anteriores, representando fases más recientes de precipitación evaporítica. La existencia de estas litologías es un factor relevante desde el punto de vista geotécnico, ya que pueden presentar fenómenos de disolución, colapsos y deformaciones diferenciales en el subsuelo.

En conjunto, la geología del área de Andorra, referenciada en la hoja de Calanda, se caracteriza por una alternancia de materiales detríticos, carbonatados y evaporíticos de origen terciario y cuaternario. **Esta complejidad litológica define un subsuelo con capas de baja permeabilidad intercaladas con niveles más porosos**, y con la singularidad de formaciones **evaporíticas susceptibles** de procesos de disolución y deformación. Estos aspectos deben ser tenidos en cuenta **en el diseño y explotación** del vertedero, ya que condicionan tanto la hidrogeología como la estabilidad del terreno.



Mapa geológico de España escala 1:50000 fuente IGME

Según lo establecido en la Guía metodológica para la ubicación de vertederos (MITERD, 2023) y en el Real Decreto 1481/2001, uno de los criterios de exclusión fundamentales para este tipo de infraestructuras es la presencia de procesos activos de inestabilidad del terreno, tales como subsidencia, karstificación, deslizamientos o deformaciones asociadas a litologías solubles. La normativa indica que no deben emplazarse vertederos en áreas donde estos procesos se encuentren activos o puedan comprometer la seguridad estructural y ambiental de la instalación.

A la vista de los datos disponibles en la cartografía geológica del IGME y en los trabajos de campo realizados, se observa que no se han identificado fenómenos de karst activo ni subsidencia en el área de estudio. Tampoco existen evidencias de deslizamientos significativos ni inestabilidades a escala regional o local. Este hecho permite descartar restricciones absolutas desde el punto de vista de la normativa, y confirma que el emplazamiento no se encuentra dentro de ninguna categoría de exclusión geológica inmediata.

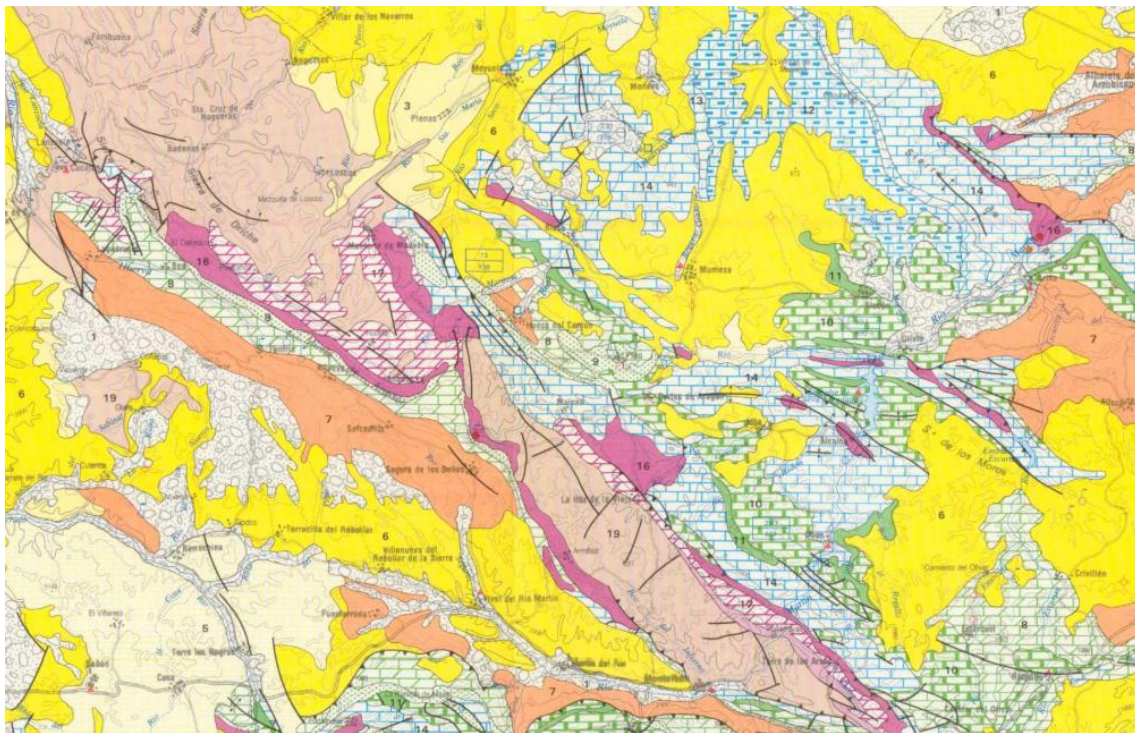
En cuanto a las características de los materiales, predominan arcillas, margas y depósitos detríticos de baja conductividad hidráulica, lo que constituye un factor favorable. **Estos materiales aportan una barrera natural que reduce la transmisividad del subsuelo** y actúa como **protección** frente a una posible migración de lixiviados hacia niveles más profundos. Se trata de un aspecto clave, dado que la propia **normativa exige que el terreno aporte un espesor y una impermeabilidad mínima** antes de considerar cualquier impermeabilización artificial.

No obstante, la presencia de **formaciones evaporíticas (halita y epsomita)** en el entorno geológico constituye un **elemento singular que debe ser considerado**. Aunque no se han detectado indicios de actividad actual de disolución en el área de implantación directa, este tipo de litologías pueden

dar lugar a **fenómenos de inestabilidad o subsidencia** en el largo plazo si se ven expuestas a infiltraciones de agua. Por ello, se recomienda incorporar en fases posteriores de proyecto un **control geotécnico e hidrogeológico específico**, destinado a verificar que los niveles evaporíticos no queden afectados por las excavaciones ni por el funcionamiento de la instalación.

El emplazamiento presenta, en términos geológicos, **condiciones favorables para albergar un vertedero de residuos inertes**, con especial relevancia del **predominio de arcillas y margas de baja permeabilidad como factor protector**. La única precaución a tener en cuenta es el control y seguimiento de las formaciones evaporíticas, a fin de evitar procesos de disolución que pudieran comprometer la estabilidad del terreno.

4.3 Mapa geológico de España 1:200.000 hoja 494 y LEYENDA



Mapa geológico de España escala 1:200.000 fuente: IGME

		PERMEABILIDAD		
		ALTA	MEDIA	BAJA
TERCIARIO	CUATERNARIO	1 Gravas, arenas, arcillas y limos		
	PLIO-CUATERNARIO		2 Calizas y margas	3 Conglomerados, arcillas y arenas
	MIOCENO		4 Calizas y margas 5 Calizas margosas, margas y yesos	6 Conglomerados, arenas y arcillas
	PALEOGENO			7 Areniscas, conglomerados, calizas, margas y arcillas
	CRETACICO SUPERIOR		8 Arenas, arcillas, calizas dolomíticas, dolomías y margas	

Leyenda del mapa geológico de España escala 1:200.000 fuente IGME

4.4 Geomorfología

La geomorfología del área de estudio está condicionada por la interacción de factores climáticos, edáficos, hidrológicos y litológicos. El emplazamiento del vertedero se ubica sobre depósitos aluviales que rellenan la depresión del río Jiloca, en una posición de valle con topografía suavemente ondulada y cotas en torno a los 700 m sobre el nivel del mar. Este tipo de relieve, prácticamente llano y de uso agrícola consolidado, ofrece buenas condiciones para la implantación de infraestructuras, ya que minimiza los movimientos de tierra y facilita la accesibilidad de maquinaria y transporte.

El entorno próximo presenta una geomorfología estructural característica, definida por la alternancia de areniscas y calizas con un buzamiento hacia el sur-suroeste. Esta disposición genera relieves de cuevas y hogbacks, en los que la diferencia de resistencia a la erosión entre las litologías da lugar a vertientes asimétricas. En las laderas más abruptas, principalmente en areniscas poco cubiertas por vegetación, se han identificado procesos de tafonización, que originan microformas erosivas como alveolos y tafonis. Aunque estas formas son indicativas de una dinámica erosiva activa, se desarrollan en áreas localizadas de pendiente pronunciada, alejadas de la zona concreta de implantación del proyecto.

Desde el punto de vista de las implicaciones geomorfológicas, el emplazamiento seleccionado presenta ventajas notables. La ubicación sobre depósitos aluviales en zona agrícola garantiza estabilidad y accesibilidad. Los riesgos erosivos detectados en laderas próximas no afectan directamente al emplazamiento, si bien ponen de manifiesto la necesidad de considerar la erosión como un factor de diseño. Además, la posición en la fosa del Jiloca hace posible la recepción de aportes laterales de escorrentía, lo que obliga a disponer de sistemas de drenaje perimetral para controlar posibles acumulaciones de agua superficial.

De acuerdo con la Guía metodológica para la ubicación de vertederos (MITERD, 2023):

- Deben descartarse zonas con pendientes inestables, erosión severa o procesos geomorfológicos activos de magnitud significativa.
- El emplazamiento analizado, al situarse sobre depósitos aluviales de relieve suave y uso agrícola, no presenta limitaciones geomorfológicas relevantes.
- No se observan deslizamientos, subsidencias ni movimientos en masa que condicionen de forma negativa la viabilidad del proyecto.

La geomorfología del área de estudio se considera favorable para la instalación del vertedero de residuos inertes. El emplazamiento reúne condiciones adecuadas de estabilidad y accesibilidad, propias de terrenos de topografía suave y sin presencia de inestabilidades activas. Como única medida de diseño, se recomienda implementar un sistema de drenaje perimetral que permita controlar los aportes de escorrentía superficial y evite fenómenos de erosión localizada en el entorno inmediato del vaso de vertido.

4.5 Climatología

La caracterización climática del área de Andorra (Teruel) se ha realizado a partir de los datos registrados en las estaciones meteorológicas de referencia más próximas (Andorra Central Térmica y Andorra Endesa), complementados con información procedente del Sistema de Información Geográfica Agraria (SIGA). El análisis indica que la zona se enmarca en el dominio bioclimático mediterráneo con influencia continental, lo que se traduce en una acusada aridez estacional, elevada amplitud térmica y precipitaciones reducidas e irregulares.

Desde el punto de vista térmico, las temperaturas medias anuales oscilan **entre 13,6 y 14,5 °C**, con **inviernos fríos en los que se registran heladas frecuentes**, consecuencia de la altitud (**~700 m s.n.m.**) y de la continentalidad del territorio. Los **veranos son cálidos y secos**, con máximas que superan los 30 °C de manera habitual. Estos contrastes térmicos generan **implicaciones directas para el comportamiento de los materiales de cobertura del vertedero**, que deberán resistir ciclos de hielo-deshielo y fisuración superficial en suelos arcillosos.

En cuanto al régimen de precipitaciones, los valores anuales se sitúan en **torno a 390–405 mm/año, claramente por debajo de la media peninsular**. Predominan los periodos secos prolongados, alternados con episodios de lluvias torrenciales en cortos intervalos de tiempo. Esta distribución temporal **condiciona la escorrentía**, con riesgos de erosión **localizada en taludes y vaguadas en episodios de tormenta**. Sin embargo, la baja pluviometría media anual limita **la recarga de acuíferos**, lo que es coherente con la no detección de nivel freático en los sondeos ejecutados en el emplazamiento.

Los índices climáticos calculados confirman estas condiciones: el índice de aridez de **Dantin-Revenge se sitúa entre 3,35 y 3,64**, y el índice de **Martonne entre 16,2 y 17,1**, clasificando la zona en la transición entre clima seco y semiárido. Estos valores corroboran **la escasa disponibilidad hídrica natural y la vulnerabilidad del territorio a procesos de desertificación** en ausencia de una gestión adecuada del suelo y el agua.

Las relaciones entre clima, edafología y vegetación son también determinantes. Los suelos agrícolas del entorno, de textura fina (limos y arcillas), son susceptibles a la compactación y a la formación de costras superficiales tras lluvias intensas. La vegetación natural responde a condiciones de aridez, con especies adaptadas a la sequía que, en términos de gestión de un vertedero, presentan una ventaja: **reducen el riesgo de intrusión radicular profunda que pudiera comprometer las barreras de impermeabilización**. El análisis climatológico se ha realizado a partir de datos obtenidos en el Sistema de Información Geográfica Agraria (SIGA), dependiente del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto

Demográfico. Se ha recurrido a dos estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio: la estación 9550D - Andorra "Central Térmica" y la estación 9550 - Andorra Endesa. A partir de los registros de temperatura y precipitación, se han calculado diversos índices climáticos que permiten establecer relaciones con la vegetación y el régimen hídrico de la zona.

Estación meteorológica 9550D Andorra “Central Térmica”

- Temperatura media anual: 14,5 °C
- Precipitación total anual: 397,90 mm
- Índice de Aridez de Dantin-Revenga: 3,64
- Índice de Martonne: 16,24

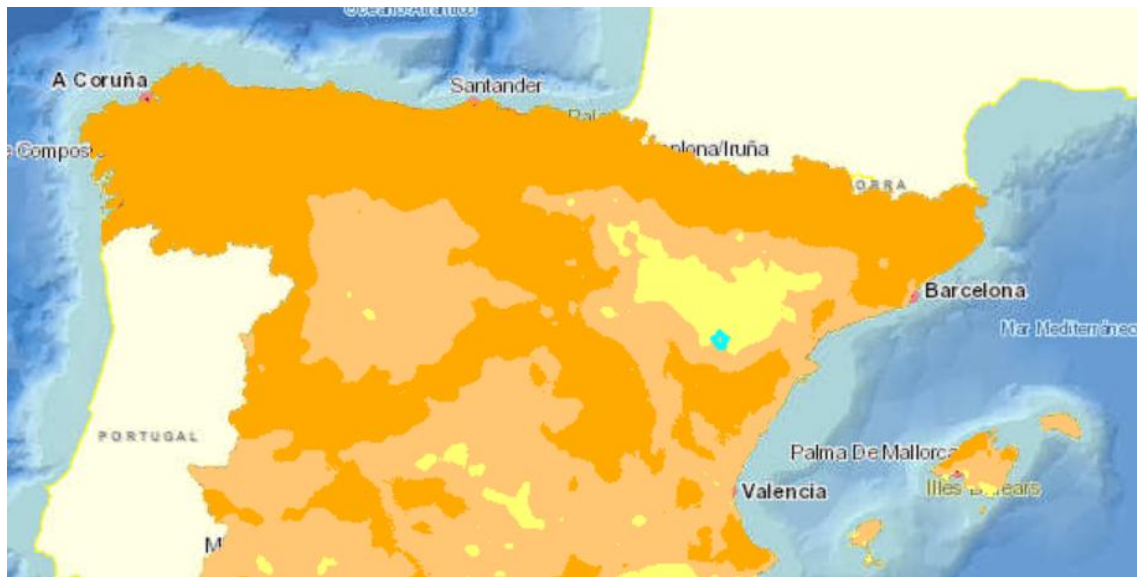
Estación meteorológica 9550 Andorra Endesa

- Temperatura media anual: 13,6 °C
- Precipitación total anual: 405 mm
- Índice de Aridez de Dantin-Revenga: 3,35
- Índice de Martonne: 17,16

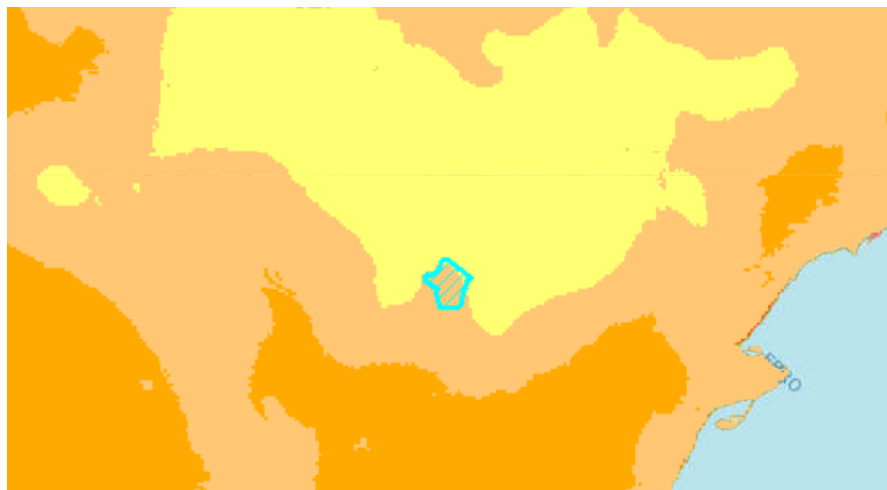
Aridez

	0 - 0.2
	0.2 - 0.5
	0.5 - 0.75
	Mayor de 0.75

Leyenda



Mapa ampliado sobre el índice de aridez Fuente: SIGA



Mapa específico en la zona de andorra Teruel sobre el índice de aridez fuente: SIGA.

4.5.1 Riesgos climatológicos.

Heladas invernales: riesgo de fisuración en materiales arcillosos superficiales y en cubiertas

Precipitaciones torrenciales: necesidad de sistemas de drenaje pluvial y control de erosión en taludes.

Vientos dominantes: posible dispersión de partículas finas en un entorno agrícola abierto, lo que aconseja barreras vegetales o cortavientos.

Según la Guía metodológica MITERD (2023) y el RD 1481/2001 **no se establecen limitaciones climáticas absolutas** para la ubicación de vertederos, **pero sí exigen que se garantice un sistema eficaz de drenaje** de aguas pluviales y la adopción de medidas frente a fenómenos extremos previsibles. **El emplazamiento de Andorra cumple estas condiciones**, al encontrarse en una zona de **baja pluviometría media**, lo que **reduce el riesgo de generación de lixiviados**, aunque exige un diseño cuidadoso frente a episodios de tormenta.

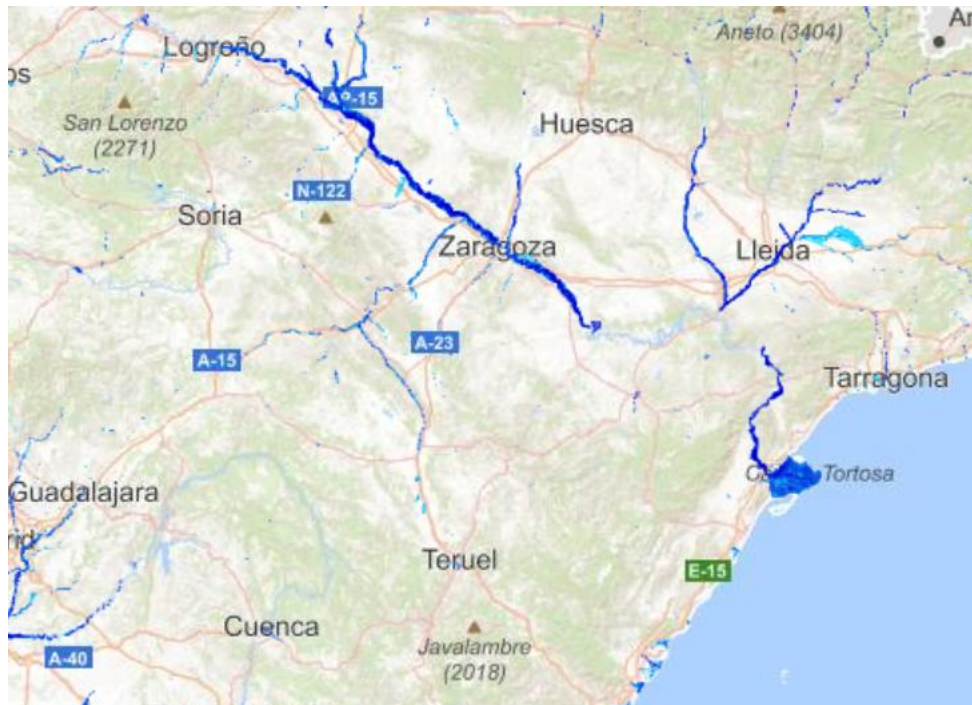
.

4.6 Estudio hidrológico.

El régimen hidrológico del área de Andorra (Teruel) está **condicionado por la combinación de su climatología semiárida**, la pendiente moderada del terreno, la litología arcillosa y margosa predominante y la escasa cobertura vegetal. Estos factores determinan una escorrentía **superficial generalmente limitada**, con baja capacidad de recarga en profundidad, pero con posibilidad de episodios de crecida repentina tras eventos excepcionales de precipitación. **La dinámica del territorio se enmarca en la cuenca hidrográfica del Ebro**, concretamente en el ámbito del valle **del río Martín**, lo que refuerza la importancia de evaluar con **detalle la peligrosidad de inundación**.

Para este análisis se utilizó el **Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI)**, que permite identificar áreas sujetas a anegamiento bajo diferentes escenarios de probabilidad (T = 10, 50, 100 y 500 años). La consulta se realizó mediante el visor oficial y complementariamente con herramientas SIG, lo que permitió localizar con precisión el emplazamiento proyectado y compararlo con las delimitaciones cartográficas de zonas inundables.

Los resultados muestran que el emplazamiento del vertedero no se encuentra dentro de ninguna zona inundable, ni siquiera bajo un escenario extremo de periodo de retorno de 500 años. Si bien existen áreas inundables asociadas al cauce del río Martín y a algunas ramblas próximas, estas se sitúan a una distancia suficiente para no constituir una amenaza directa para la instalación. De este modo, el emplazamiento cumple con lo dispuesto en la normativa vigente.



Mapa T 500 años del SNCZI a mayor escala



Mapas de peligrosidad de inundación para periodos de retorno de 10 y 500 años en el área de estudio (Andorra, Teruel) Fuente: Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables – SNCZI (MITECO, 2023).

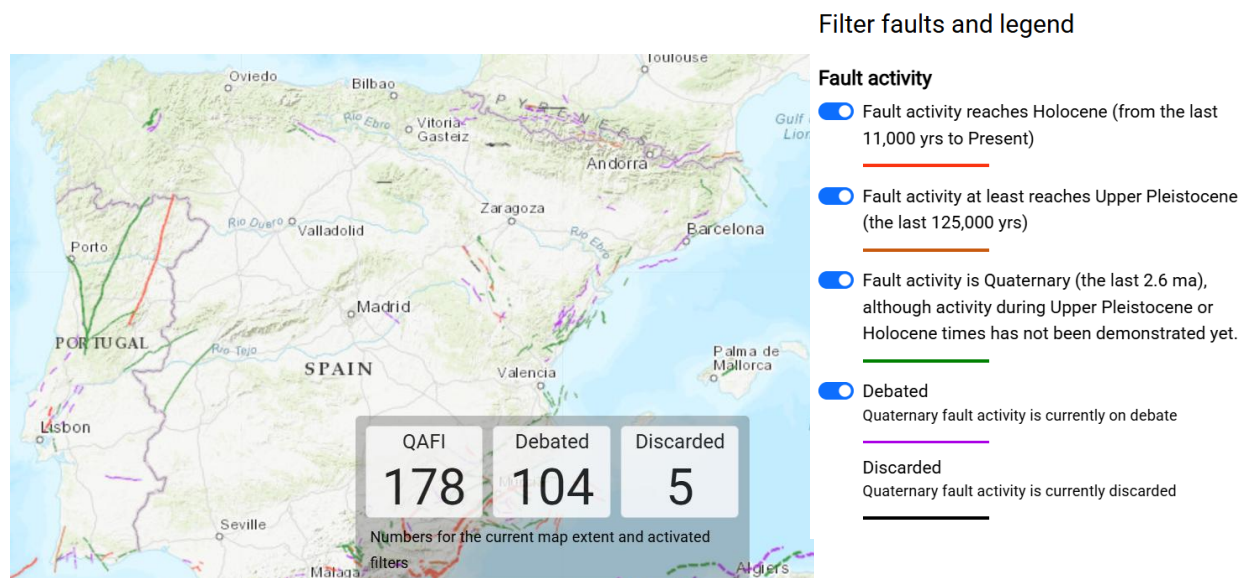
De acuerdo con la **Guía metodológica para la ubicación de vertederos (MITERD, 2023)** y el **RD 1481/2001**, la instalación de vertederos está prohibida en zonas inundables con periodos de retorno **iguales o superiores a 100 años**. El emplazamiento de Andorra **cumple esta condición**, al situarse fuera de cualquier zona de riesgo hidrológico definido. El SNCZI constituye, además, una herramienta de consulta obligatoria en fase de estudios previos y de justificación ambiental, por lo que el análisis aquí realizado aporta respaldo técnico y administrativo a la viabilidad del proyecto.

Por tanto, la **ausencia de afección directa** por inundaciones fluviales constituye un factor favorable de primer orden en la selección del emplazamiento. El área combina condiciones de baja escorrentía general con la seguridad de no verse afectada por avenidas de los cauces principales. No obstante, se debe prever sistemas de drenaje superficial perimetral, con el fin de controlar aportes de agua de escorrentía lateral en episodios de lluvia torrencial y evitar acumulaciones en el vaso de vertido.

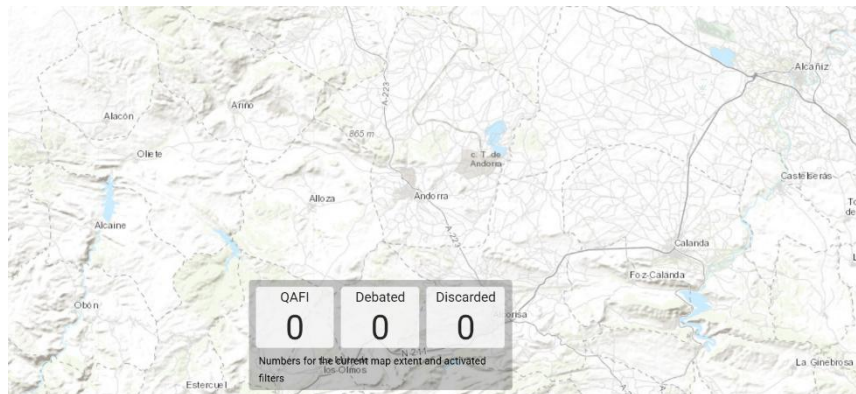
4.7 Sismicidad.

El análisis realizado a partir del Catálogo de Terremotos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) indica que el municipio de Andorra (Teruel) se encuentra en una zona de actividad sísmica muy baja. Los registros históricos únicamente documentan dos eventos de magnitud reducida: uno en 1998 y otro en 2021, este último con magnitud 1,7 Mw, valor que carece de capacidad destructiva y que pasa inadvertido para la población.

La información se complementa con la Base de Datos de Fallas del Cuaternario de la Península Ibérica, que confirma que en el entorno del emplazamiento no existen fallas activas con evidencias de actividad tectónica reciente. Esta ausencia de estructuras potencialmente sismogénicas refuerza el carácter tectónicamente estable de la comarca. Asimismo, el mapa de peligrosidad sísmica de España (IGN, 2012; revisión 2021) sitúa a Andorra-Sierra de Arcos dentro de las zonas con menor aceleración sísmica básica de la península, con valores inferiores a 0,04 g, lo que supone que, a nivel normativo, no se requieren medidas adicionales especiales para infraestructuras de este tipo

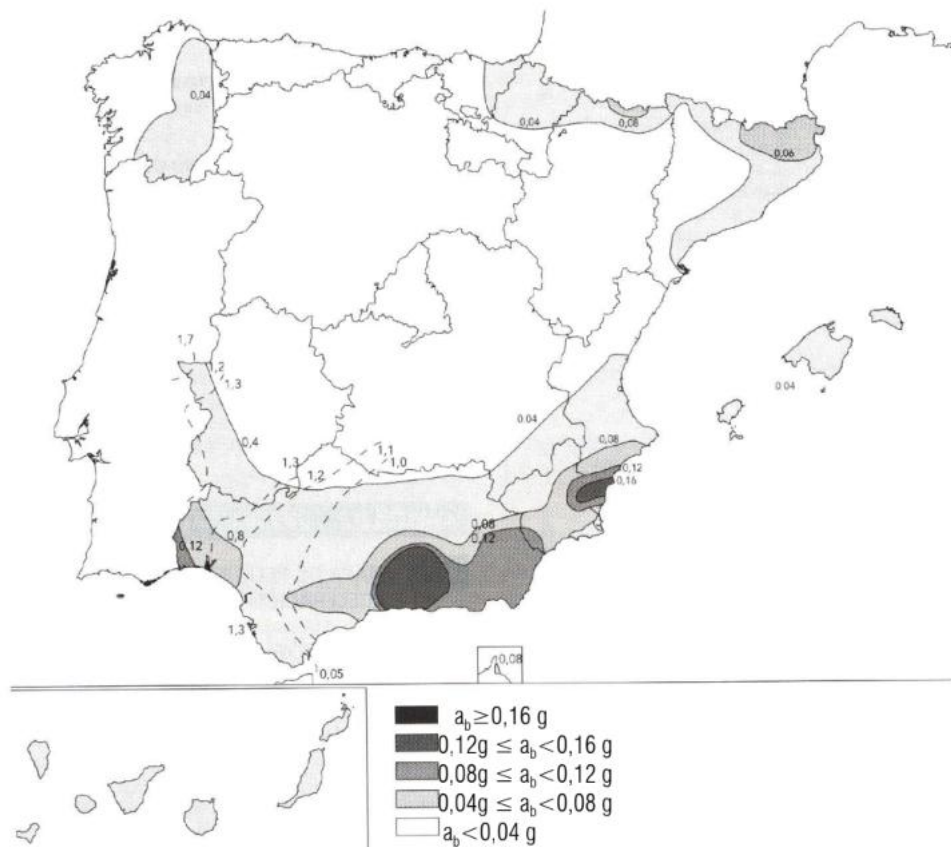


mapa según Base de Datos de Fallas Activas y Capaces de la Península Ibérica con el desarrollo de cada una de estas fuente:IGME



*mapa según Base de Datos de Fallas Activas y Capaces de la Península Ibérica de la zona
estudio fuente:IGME*

se presenta a su vez el mapa del territorio nacional con sus zonas sísmicas:



Mapa zonas sísmicas fuente: instituto geográfico nacional

El análisis sísmico del emplazamiento de Andorra (Teruel) **se fundamenta en la aplicación de la Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02)** y en los datos de aceleración sísmica básica proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). La aceleración sísmica básica (a_b) **en la zona es inferior a 0,04 g**, lo que sitúa al municipio en una de las categorías de peligrosidad sísmica **más bajas de España**. Este valor confirma el carácter **tectónicamente estable del área**, coherente **con la ausencia de fallas cuaternarias** activas en el entorno y con la escasa recurrencia histórica de terremotos en la comarca.

La aceleración sísmica de diseño se calcula aplicando la expresión:

$$a = S \times p \times a_b$$

donde:

a_b es la aceleración sísmica básica (<0,04 g en Andorra).

p es el coeficiente de riesgo, dependiente de la vida útil de la infraestructura (para un vertedero se suele considerar un horizonte de explotación de 20–30 años más el periodo de postclausura).

S es el coeficiente de amplificación del terreno, determinado en función de las condiciones geotécnicas locales.

En este emplazamiento, donde **predominan margas y arcillas compactas** con baja capacidad de amplificación sísmica, **el valor de S se mantiene en niveles bajos**, lo que contribuye **a reducir aún más la sollicitación dinámica esperable**.

La NCSE-02 establece que, incluso en zonas de baja sismicidad, **deben verificarse ciertos aspectos de estabilidad estructural**. En el caso concreto de un vertedero de residuos inertes, estas verificaciones se simplifican al tratarse de una infraestructura sin elementos estructurales de gran altura ni instalaciones críticas. Las principales comprobaciones para considerar son:

- Estabilidad global y local de taludes frente a cargas sísmicas de diseño, aplicando coeficientes de seguridad reducidos que simulan el efecto de sollicitaciones dinámicas.
- Integridad de las capas de sellado (arcillas compactadas y geomembranas), asegurando que las deformaciones inducidas por un evento sísmico menor no produzcan pérdida de impermeabilidad ni fisuración significativa.
-

- Comportamiento de las capas drenantes y de las redes de tuberías, cuya continuidad debe garantizarse en escenarios de pequeñas deformaciones.

A nivel de normativa específica de vertederos (RD 646/2020 y guías MITERD), no se introducen exigencias adicionales en zonas de baja peligrosidad sísmica, más allá de la **aplicación de los criterios de la NCSE-02** y de las buenas **prácticas de ingeniería civil**.

Esta condición de baja sismicidad simplifica el diseño geotécnico, lo que genera a su vez menores costes de construcción asociados a refuerzos adicionales y aumenta la seguridad a largo plazo frente a posibles daños estructurales.

Aunque el riesgo es mínimo, se reduce el principio de precaución, verificando la estabilidad de taludes con cargas sísmicas de diseño y asegurando que las capas de sellado dispongan de la resistencia y flexibilidad necesarias para soportar deformaciones menores. Estas medidas, aunque de carácter rutinario, garantizan la robustez de la instalación frente a escenarios sísmicos poco probables pero posibles.

El emplazamiento es favorable desde el punto de vista sísmico, ya que cumple la normativa vigente. Solamente será necesario realizar verificaciones mínimas de estabilidad estática y dinámica, sin necesidad de medidas adicionales significativas.

5. PERFIL LITOLÓGICO DEL TERRENO.

El perfil litológico del terreno ha sido determinado a partir de los cuatro sondeos realizados en la parcela objeto del estudio, con profundidades de hasta 15 metros.

Se observa la siguiente estructura:

Nivel superficial (0–0,5 m): capa de suelo vegetal y rellenos antrópicos en parte de la zona, con textura limo-arenosa y contenido variable de gravas.

Nivel intermedio (0,5–3 m): alternancia de limos arcillosos y arenas limosas, con plasticidades bajas a medias ($IP \approx 7-9\%$).

Nivel profundo (>3 m): presencia de gravas limo-arenosas y, en algunos puntos, capas de arcilla de baja plasticidad (CL) con finos >50 %, según análisis granulométrico y Atterberg.

Los resultados muestran una estratigrafía sub horizontal formada por tres niveles principales: una capa superficial limo-arenosa con gravas, un nivel intermedio de limos arcillosos y arenas limosas, y un nivel profundo con gravas limo-arenosas y arcillas de baja plasticidad.

En términos generales, la estratigrafía presenta continuidad lateral, compacidad y ausencia de estructuras tectónicas activas, sin evidencias de plegamientos ni fallas que pudieran comprometer la estabilidad del terreno. Las muestras ensayadas en laboratorio (granulometría y límites de Atterberg) confirman que predominan materiales finos (arcillas y limos), con índices de plasticidad bajos a medios ($IP \approx 7-9\%$), lo que les confiere cohesión y baja permeabilidad, aunque con cierta sensibilidad a variaciones de humedad en niveles superficiales.



Figura 5. Planta general de la zona de sondeos y calicatas

Las muestras extraídas fueron analizadas en laboratorio a profundidades de 3, 6, 9 y 12 metros, confirmando la continuidad litológica y la compacidad de las margas. E

A continuación, se presenta el perfil geológico:

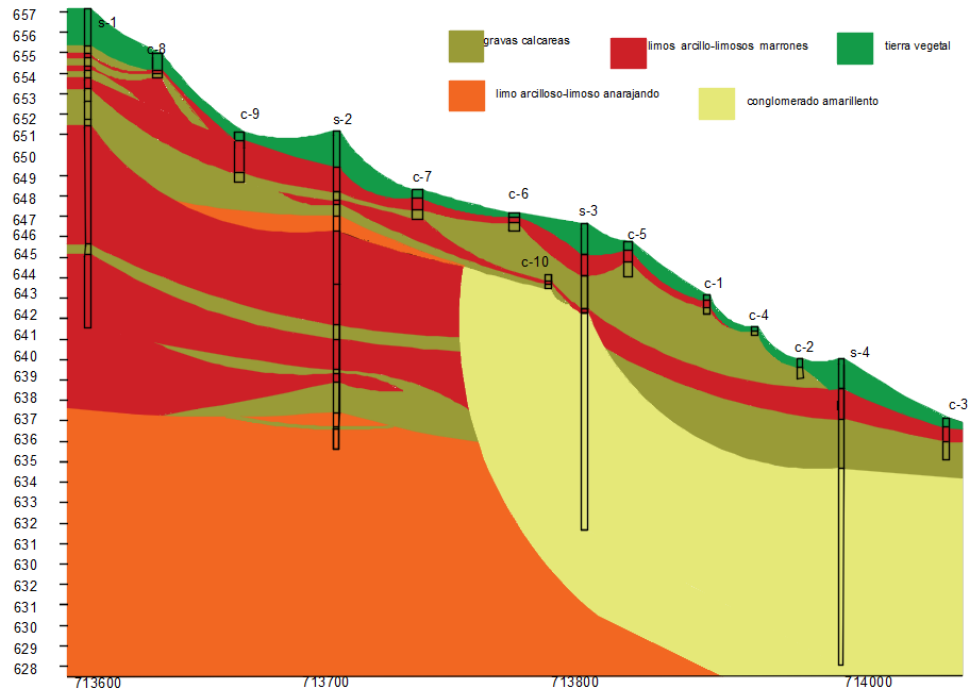


Figura 6. Perfil geológico

De acuerdo con el RD 1481/2001, el RD 646/2020 y la Guía metodológica del MITERD (2023), todo vertedero debe contar con una barrera geológica natural que garantice una conductividad hidráulica $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s, o en su defecto, debe reforzarse con una barrera artificial. En este caso:

Los niveles arcillosos y limosos predominantes cumplen en gran medida este requisito, actuando como barrera natural.

El nivel intermedio (arenas limosas) **puede presentar permeabilidad moderada**, por lo que será necesario reforzarlo mediante sellado artificial con arcilla compactada o geomembranas.

La **ausencia de estructuras tectónicas** reduce la posibilidad de vías preferentes de flujo subterráneo, lo cual **refuerza la viabilidad del** emplazamiento.

5.1. Implicaciones geotécnicas e hidrogeológicas:

Arcillas y limos predominantes:

- Baja permeabilidad y cohesión suficiente.
- Actúan como barrera natural frente a la infiltración de lixiviados.
- Relevantes para la protección de aguas subterráneas.

Arenas limosas intermedias (0,5–3 m)

- Permeabilidad moderada y menor compacidad.
- Constituyen un estrato crítico que debe reforzarse en el diseño.

Gravas limo-arenosas y arcillas profundas (>3 m)

- Mayor permeabilidad potencial, pero con carácter discontinuo y poco potente.
- No constituyen un acuífero, aunque requieren control piezométrico para descartar continuidad lateral.
- Estratigrafía subhorizontal y sin fallas
- Garantiza uniformidad geomecánica.
- Reduce la probabilidad de inestabilidad estructural.

- Conductividad hidráulica global

Se observa por tanto que, debido al predominio de **materiales finos**, el perfil presenta baja transmisividad, **aproximándose al umbral normativo** sin necesidad de grandes aportes externos ya que aporta de manera natural una base geotécnica e hidrogeológica favorable para la construcción del vertedero. **El predominio de materiales arcillosos y limosos de baja permeabilidad constituye un factor protector clave** frente a la infiltración de lixiviados. Aunque se identifica a su vez, niveles intermedios **más permeables**, una vez localizados y deberán ser tratados mediante **soluciones constructivas** habituales en vertederos (barrera mineral compactada, geomembranas o geosintéticos).

5.2. Ensayo Lefranc

El **estudio hidrogeológico** realizado en el **emplazamiento del futuro vertedero** de residuos inertes en Andorra (Teruel) **incluyó la ejecución de ensayos Lefranc** in situ en varios sondeos mecánicos (S-2, S-3 y S-4). El objetivo **fue determinar la conductividad hidráulica (k)** de los materiales atravesados y **evaluar la capacidad del sustrato como barrera geológica natural**, requisito indispensable para este tipo de infraestructuras según la **normativa española y europea**.

El presente informe recoge los resultados e interpretación de los ensayos de permeabilidad in situ tipo Lefranc realizados en el marco del estudio hidrogeológico para la implantación de un vertedero de residuos inertes en Andorra (Teruel).

Este es prueba de **permeabilidad in situ**, normalmente ejecutada **en sondeos**, que consiste en **inyectar o extraer agua** en una cavidad de dimensiones conocidas manteniendo una **carga hidráulica constante** (ensayo a carga constante) o midiendo la disipación de la carga (ensayo a carga variable). En este caso, se ha empleado el método de carga constante.

Se registró el caudal estabilizado y, a partir de él, se calculó el coeficiente de permeabilidad k aplicando diversas formulaciones: Lefranc original, Custodio, Jiménez Salas y Fabre.

La cavidad ensayada presentaba una longitud de entre 1,1 y 1,4 m y un diámetro de 101 mm, condiciones que permiten asumir un régimen de flujo predominantemente radial hacia el terreno circundante.

La expresión general para el cálculo de la permeabilidad en flujo radial es:

$$k=2\pi LHQ \cdot \ln(rwR)$$

Donde Q es el caudal (m³/s), L la longitud de la cavidad (m), H la carga hidráulica (m), R el radio de influencia y rw el radio del sondeo.

Tabla resumen de valores medios de k por sondeo (s-2, s-3 y s-4) y profundidad:

Sondeo	Ensayo	Profundidad (m)	k medio (m/s)	k medio (cm/s)
S-2	1	2	7.23E-06	7.23E-04
S-2	2	5	2.45E-06	2.45E-04
S-2	3	9	1.58E-06	1.58E-04
S-2	4	12.5	2.22E-06	2.22E-04
S-3	1	2	5.02E-06	5.02E-04
S-3	2	5	3.13E-07	3.13E-05
S-3	3	11.6	7.73E-08	7.73E-06
S-4	1	3	3.42E-06	3.42E-04
S-4	2	5	4.74E-08	4.74E-06
S-4	3	12	6.40E-08	6.40E-06

Tabla del coeficiente de permeabilidad medio (k) en función de la profundidad.

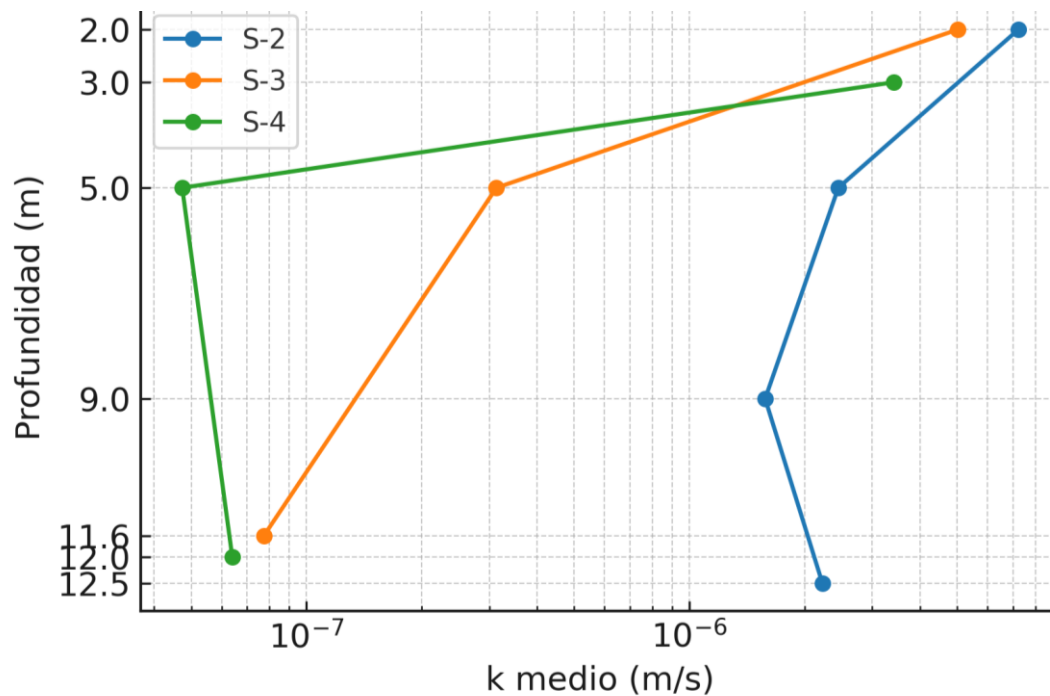


Figura 8. Histograma de la tabla en función de la permeabilidad.

Resultados obtenidos

Los valores de k medidos presentan un claro gradiente decreciente con la profundidad:

Niveles superficiales (0–3 m):

Valores de 10^{-6} – 10^{-7} m/s, asociados a materiales más sueltos como gravas limo-arenosas y arenas limosas. Se trata de materiales heterogéneos, con mayor porosidad y conductividad hidráulica moderada.

Niveles intermedios (3–6 m):

Valores próximos a 10^{-7} m/s, coherentes con una mayor compactación y con la presencia de limos arcillosos.

Niveles profundos (>6–12 m):

Valores muy bajos, del orden de 10^{-8} m/s, especialmente en el sondeo S-4, donde predominan margas calcáreas compactas y arcillas. Estos valores confirman la presencia de un sustrato de muy baja permeabilidad.

Los resultados muestran que la permeabilidad disminuye con la profundidad, desde valores del orden de 10^{-6} – 10^{-7} m/s en niveles someros hasta valores del orden de 10^{-8} m/s en niveles más profundos, especialmente en el sondeo S-4. Esto es coherente con el perfil litológico identificado, donde los primeros metros presentan materiales más sueltos (gravas y limos) y el sustrato profundo está formado por margas calcáreas muy compactas y de baja permeabilidad.

A su vez, los resultados indican que el terreno para vertedero presenta:

- **Una barrera natural eficaz** en profundidad, con permeabilidades **muy por debajo del límite normativo** ($k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s).
- Niveles **superficiales y sub-superficiales** con permeabilidad moderada, que podrían permitir cierto movimiento de agua en ausencia de medidas de sellado.
- **Ausencia de acuíferos** significativos **en los primeros 15 m**, ya que no se detectaron niveles continuos de alta transmisividad, sino intercalaciones locales sin continuidad lateral.

Esto significa que, desde el punto de vista hidrogeológico, el riesgo de contaminación de aguas subterráneas es muy bajo, siempre que se refuercen adecuadamente los niveles superiores.

La normativa aplicable exige garantizar una impermeabilidad mínima:

RD 1481/2001 establece la obligación de disponer de una barrera natural o artificial equivalente a $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s.

RD 646/2020 refuerza la necesidad de un sistema de impermeabilización con barrera mineral y/o geosintética, incluso en emplazamientos con buenas condiciones naturales.

Guía MITERD 2023 recomienda complementar la caracterización natural con una barrera artificial en los niveles más permeables y un sistema de drenaje eficaz para lixiviados.

En este caso se observa que, los valores profundos (10^{-8} m/s) **cumplen holgadamente la normativa**. Sin embargo, **los valores superficiales** ($\sim 10^{-6}$ m/s) **requieren un refuerzo artificial** para garantizar el cumplimiento normativo en toda la base del vaso.

Se tiene por tanto que los ensayos Lefranc confirman que el emplazamiento de Andorra presenta condiciones hidrogeológicas muy favorables para albergar un vertedero de residuos inertes. El sustrato profundo actúa como una barrera natural de muy baja permeabilidad, ofreciendo una base hidrogeológica idónea, con la condición de reforzar los niveles superficiales mediante barreras artificiales y sistemas de drenaje.

6. NIVEL FREÁTICO.

6.1. Observaciones durante la campaña

Durante la campaña de investigación, se ejecutaron sondeos mecánicos de 6–8 m de profundidad y calicatas de hasta 3 m, sin detectarse la presencia de un nivel freático libre en el rango estudiado. Todo el avance se realizó en seco, sin afloramiento de agua en la columna de perforación.

En algunas calicatas superficiales se observaron humedades localizadas en horizontes limo-arcillosos y arenas limosas, que se atribuyen a agua retenida en poros o a la presencia de niveles colgados tras episodios de precipitación. Estos fenómenos son habituales en suelos finos y carecen de continuidad lateral, por lo que no constituyen un acuífero.

6.2. Interpretación hidrogeológica

Los ensayos Lefranc realizados en los niveles más permeables (arenas y gravas) mostraron coeficientes de permeabilidad bajos a muy bajos (10^{-6} – 10^{-8} m/s), lo que indica:

Baja transmisividad del medio, con escasa capacidad de circulación de agua subterránea.

La probable existencia de un acuífero regional profundo, situado a mayor cota (>15–18 m), fuera del rango investigado en esta campaña.

Las humedades detectadas son coherentes con niveles colgados formados sobre horizontes arcillosos poco permeables, sin continuidad lateral y de carácter puntual.

En consecuencia, se concluye que en el área de Andorra no existe un freático regional en los primeros metros del subsuelo; de haberlo, se situaría en condiciones más profundas o confinadas.

6.3. Implicaciones para el proyecto

De acuerdo con el RD 1481/2001 y la Guía metodológica MITERD (2023):

- Se exige una separación vertical mínima de ≥ 2 m entre el fondo del vaso y el nivel freático medio de los últimos 10 años.
- En este emplazamiento, al no haberse interceptado agua en los primeros 6–8 m, esta condición se cumple de forma holgada.
- La normativa establece también la obligación de instrumentar el emplazamiento con piezómetros de control, con el fin de verificar la profundidad real del freático y monitorizar su evolución estacional.

6.4. valoración crítica

La ausencia de un nivel freático somero tiene importantes beneficios técnicos y ambientales:

Protección natural frente a la contaminación, al no existir acuíferos superficiales, los lixiviados carecen de una vía directa **de afectación a aguas subterráneas**. A su vez, se reduce significativamente la **vulnerabilidad hidrogeológica del emplazamiento**.

Cumplimiento normativo, se cumple **con holgura la exigencia de separación mínima** establecida por la normativa. El emplazamiento **evita así restricciones** que podrían invalidarlo de forma inmediata.

Beneficios en diseño y explotación, no es necesario **calcular presiones hidrostáticas** sobre la impermeabilización, se eliminan riesgos de flotación de geomembranas o barreras artificiales, comunes en terrenos con freático alto. Y además se incrementa la estabilidad global de los taludes al no existir agua intersticial en profundidad

7. PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES.

Para caracterizar los materiales presentes en el emplazamiento del vertedero, se realizaron ensayos de laboratorio en tres muestras representativas del subsuelo (M-1, M-2 y M-3), correspondientes a los niveles de gravas limo-arenosas, gravas limosas y arcillas de baja plasticidad respectivamente. Estos ensayos incluyeron análisis granulométricos y la determinación de los límites de Atterberg (límites líquido y plástico).

7.1. Muestra M-1: Gravas limo-arenosas.

Según el análisis granulométrico, la muestra M-1 presenta un 33.1% de gravas, un 31.1% de arenas y un 35.8% de limos y arcillas. La humedad natural del suelo fue del 9.1%. El límite líquido (WL) fue de 24.2%, el límite plástico (WP) de 8.6% y el índice de plasticidad (IP) de 15.6, lo cual indica un suelo de plasticidad baja-media y comportamiento estable frente a cambios de humedad. Este tipo de suelo resulta adecuado como base estructural, siendo moderadamente permeable y resistente a deformaciones.

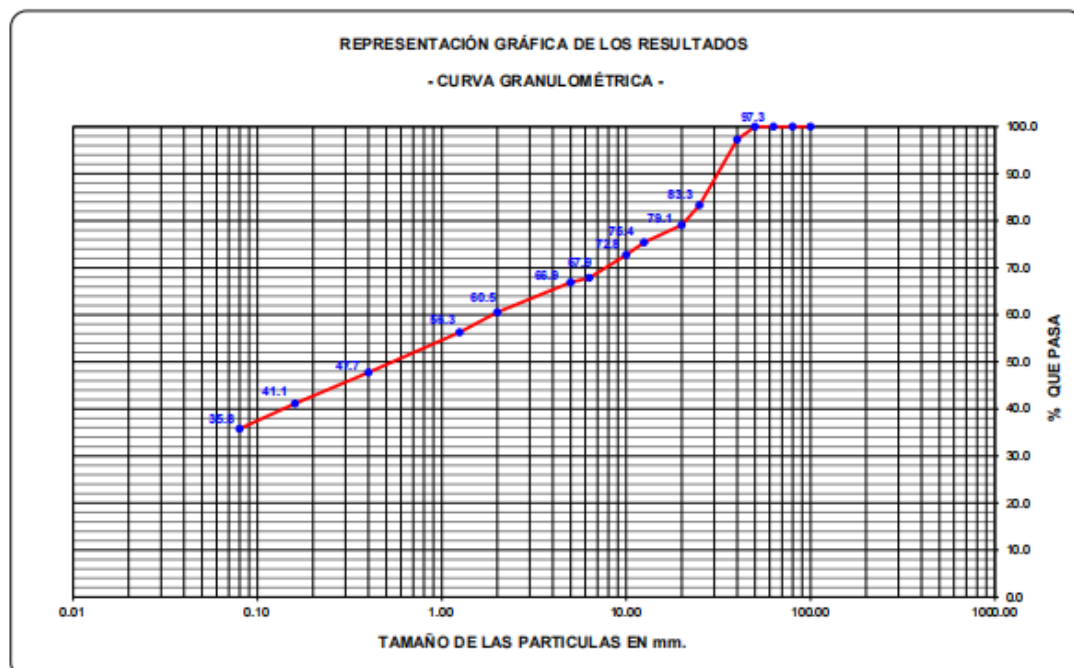


Figura 9. Curva granulométrica de M-1

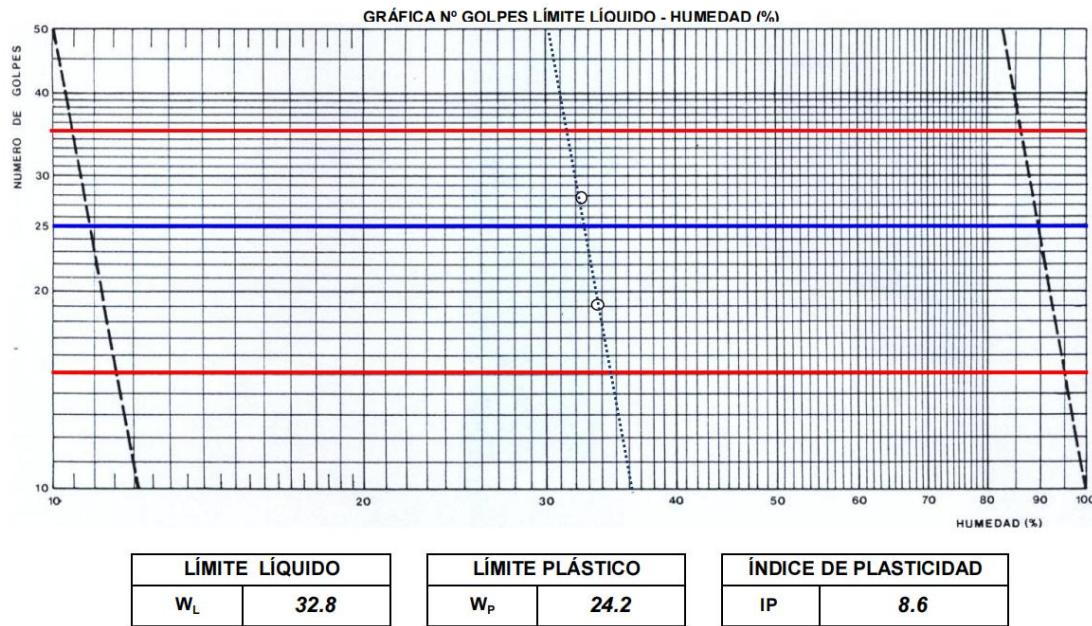


Figura 10. cálculo de índice de plasticidad M-1

M-1: Gravas limo-arenosas

Características:

- Material granular con contenido significativo de finos ($\approx 36\%$).
- Índice de plasticidad medio-bajo ($IP \approx 15,6$), lo que indica cierta cohesión pero con tendencia a permeabilidad moderada.
- Buena capacidad portante y resistencia mecánica.

Implicaciones para el vertedero:

Normativa (RD 1481/2001 y Guía MITERD 2023): exige que el fondo del vaso esté protegido por una barrera natural o artificial que garantice permeabilidad $\leq 1 \times 10^{-7}$ m/s.

El material M-1, por su granulometría, presenta un k más alto ($\approx 10^{-6}$ m/s), lo que no asegura por sí mismo la impermeabilidad exigida.

Puede emplearse como capa de soporte estructural, aportando estabilidad mecánica y capacidad de drenaje en rellenos, pero no debe quedar en contacto directo con los lixiviados sin protección.

Por tanto, si este estrato aparece en la base del vaso, debe cubrirse con una barrera artificial (arcilla compactada, GCL o geomembrana PEAD).

7.2. Muestra M-2: Gravas limosas.

En la muestra M-2 se detectó una proporción de arenas del 34.6% y un contenido fino (limos y arcillas) del 54.4%, lo que indica un comportamiento menos granular que la M-1. El límite líquido fue de 25.7% y el plástico de 8.4%, con un índice de plasticidad de 17.3. Aunque la plasticidad sigue siendo baja, el incremento de finos implica mayor retención de agua, lo que puede afectar su compactación y estabilidad, por lo que se recomienda su uso con control hidro técnico específico si se encuentra en el vaso del vertedero.

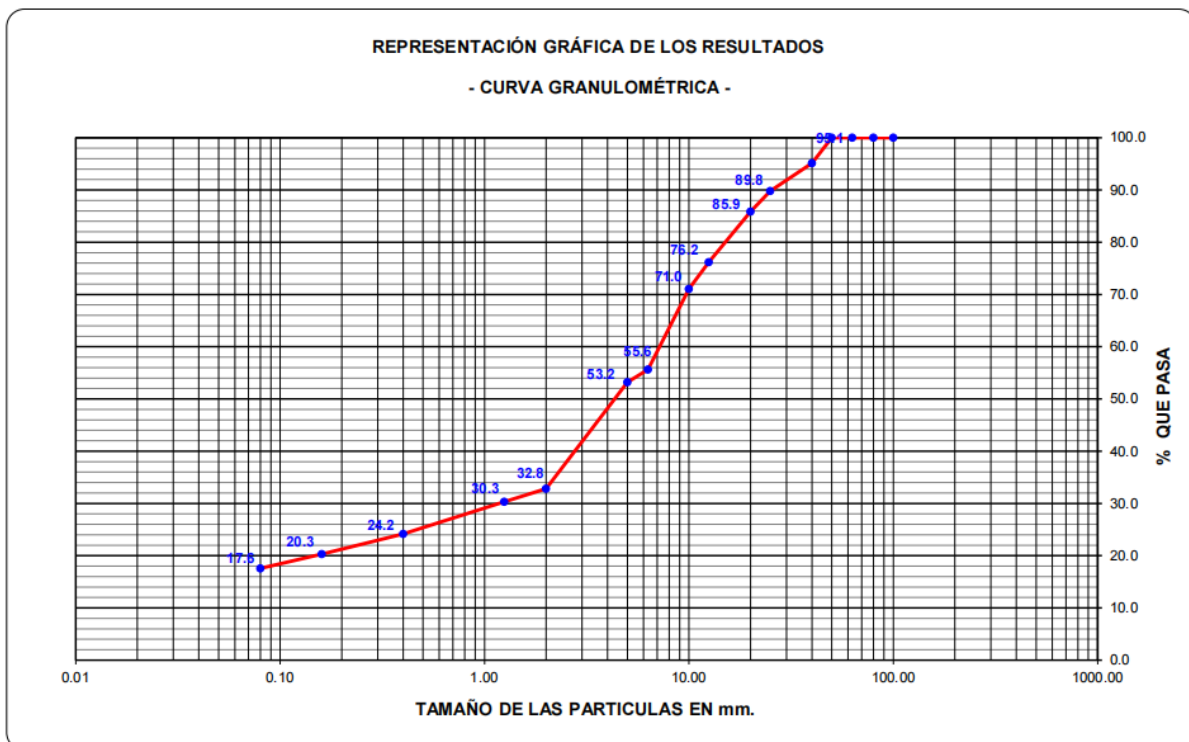


figura 11. Curva granulométrica M-2

OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE RESULTADOS

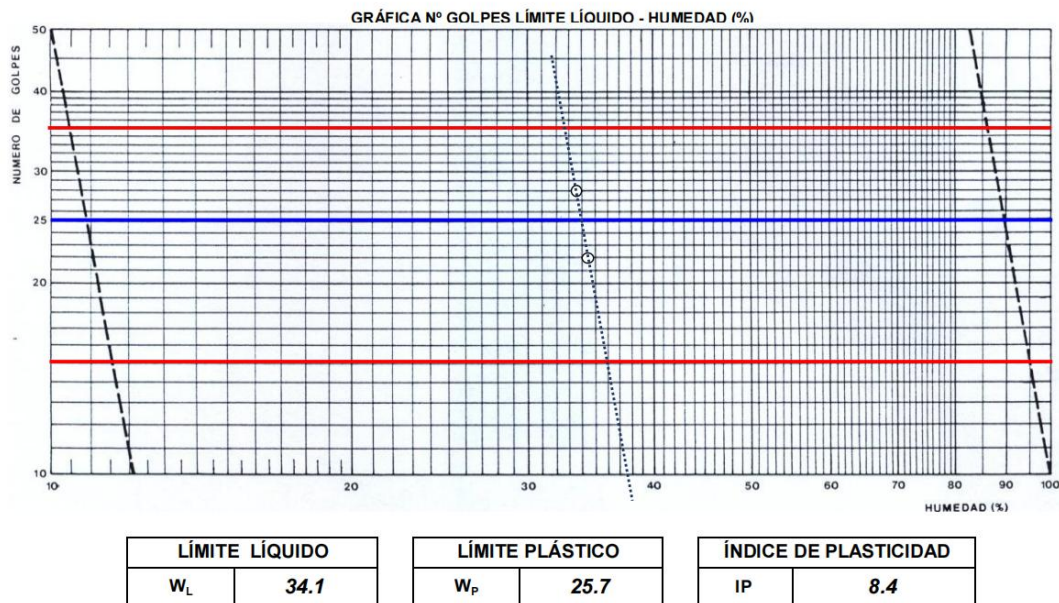


Figura 12. cálculo de índice de plasticidad M-2

Características:

- Contenido alto de finos ($\approx 54\%$), lo que le confiere menor permeabilidad que M-1.
- $IP \approx 17,3$, lo que indica **plasticidad baja-moderada**, con cierta capacidad de retener agua y comportarse como **material semicohesivo**.
- Compactación más sensible a la humedad: puede perder capacidad portante si no se controla.

Implicaciones para el vertedero:

Aunque este material presenta mejor impermeabilidad natural que M-1, **por sí solo no alcanza los valores requeridos en todos los casos.**

Este puede actuar como parte de la **barrera geológica natural**, reduciendo la necesidad de espesores artificiales elevados, ya que su plasticidad moderada lo hace menos vulnerable a la fisuración por retracción que arcillas muy plásticas.

Para este material deberá realizarse una **compactación controlada** (≥ 95 % Proctor Modificado), asegurando contenido de humedad óptimo.

Si aparece en la base del vaso, debe reforzarse con una **barrera artificial complementaria** (p. ej., arcilla compactada de menor permeabilidad).

Puede ser útil en la **cobertura final del vertedero**, como parte de la capa de sellado por su buena trabajabilidad.

7.3. Muestra M-3: Arcillas de baja plasticidad.

Esta muestra representa el nivel más fino y cohesivo del terreno. Contiene un 10.9% de gravas, un 34.6% de arenas y un 54.4% de limos y arcillas. El límite líquido fue de 21.3%, el plástico de 7.2% y el índice de plasticidad resultó en 14.1. Su comportamiento es típicamente cohesivo, de baja permeabilidad y plasticidad moderada, lo cual puede contribuir positivamente al sellado natural de la base del vertedero si se encuentra en contacto directo con la capa de lixiviados.

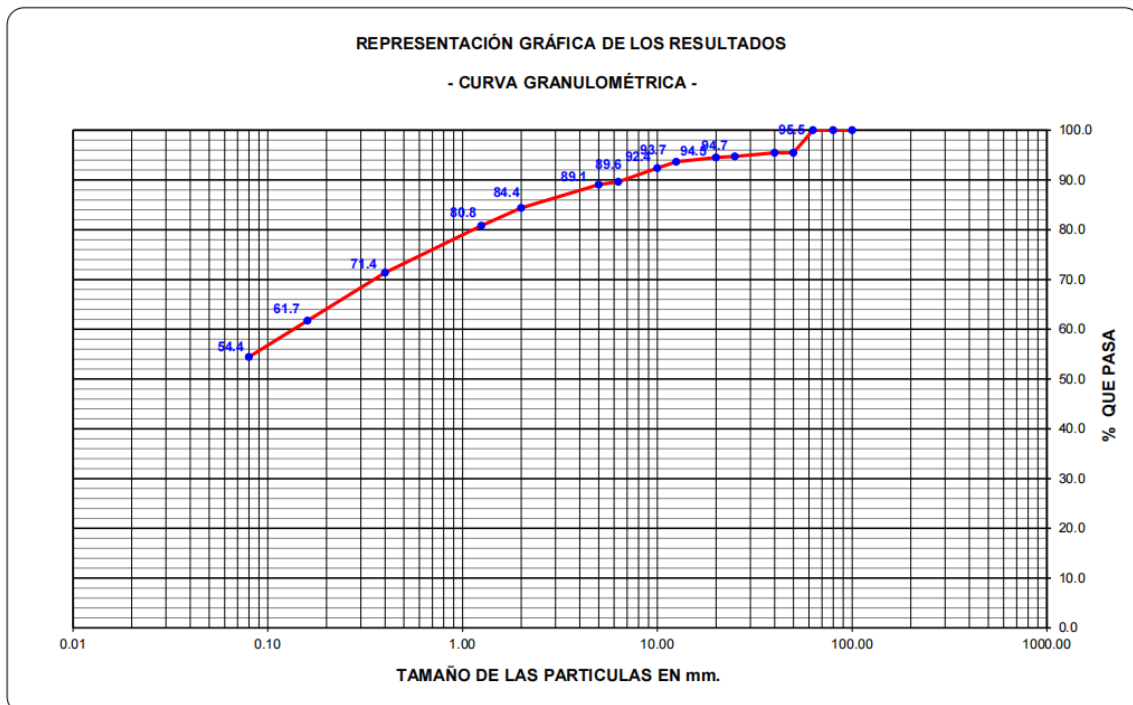


Figura 13. Curva granulométrica M-3

OBTENCIÓN Y EXPRESIÓN DE RESULTADOS

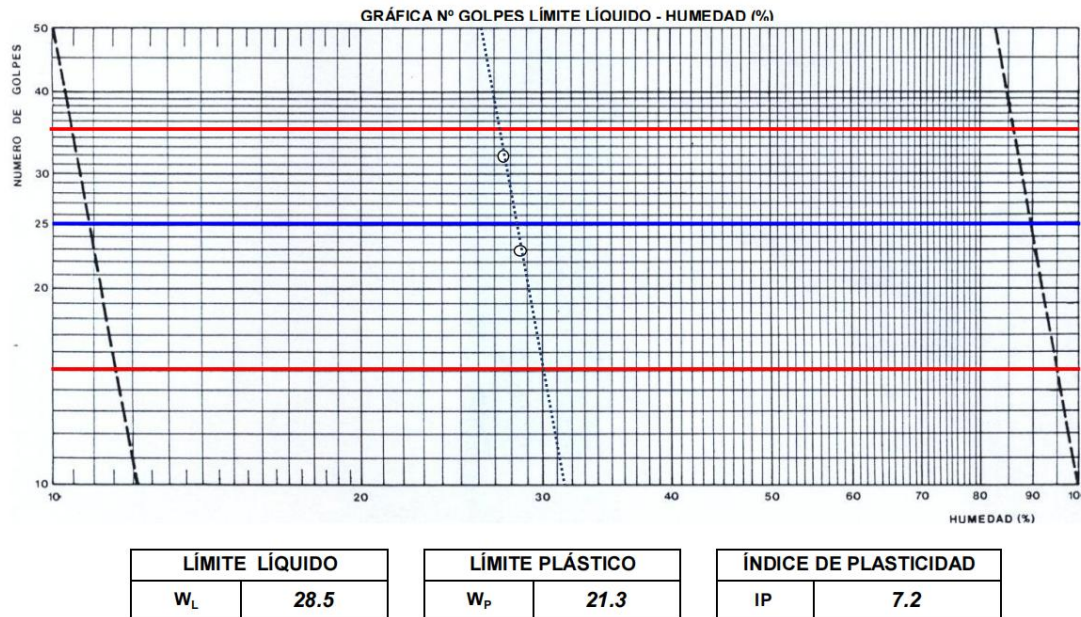


Figura 15. Cálculo de índice de plasticidad M-3

Características

- Material cohesivo con predominio de limos y arcillas ($\approx 54\%$).
- $IP \approx 14,1$ plasticidad moderada, con buen equilibrio entre cohesión e impermeabilidad.
- Baja permeabilidad natural, comportamiento favorable como **material de sellado**.

Este material se aproxima a lo exigido para barrera natural ($k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s).

Puede actuar directamente como **parte de la barrera geológica natural** en el fondo del vaso. Su moderada plasticidad lo hace **menos vulnerable a agrietamientos** que arcillas expansivas de IP alto.

Se tiene por tanto que, en combinación con medidas artificiales, puede constituir un sistema de sellado robusto. Si se encuentra en la base del vaso, se puede aprovechar su **impermeabilidad natural**, complementada con un refuerzo artificial (geomembrana PEAD o GCL). Ya que su empleo es especialmente recomendable en **zonas críticas de confinamiento** y como parte de la **cobertura final**.

Se debe tener un control de compactación para asegurar continuidad y evitar fisuración.

A continuación, se presenta una tabla en la que se muestran las diferentes muestras y su uso recomendado en función de sus características.

Muestra	Granulometría principal	IP	Permeabilidad esperada	Implicación normativa (RD 1481/2001, Guía MITERD 2023)	Papel recomendado en el vertedero
M-1 Gravas limo-arenosas	33 % gravas, 31 % arenas, 36 % finos	15,6	Moderada (10^{-6} m/s)	No cumple como barrera natural	Rellenos y soporte estructural, no contacto con lixiviados
M-2 Gravas limosas	35 % arenas, 54 % finos	17,3	Baja-moderada (10^{-7} m/s)	Puede contribuir a la barrera, requiere refuerzo	Base del vaso (con refuerzo), cobertura final compactada
M-3 Arcillas CL	11 % gravas, 35 % arenas, 54 % finos	14,1	Baja $(\leq 10^{-7} - 10^{-8} \text{ m/s})$	Cumple condiciones de barrera natural	Parte de la barrera de fondo, sellado y cobertura

Tabla comparativa de las muestras para vertedero.

El análisis de granulometría y límites de Atterberg demuestra que los materiales presentes en Andorra ofrecen un **equilibrio muy favorable** para la implantación del vertedero:

- **M-1** aporta estabilidad mecánica pero no impermeabilidad, se debe controlar.
- **M-2** constituye un estrato de transición con cierta impermeabilidad, debe reforzarse.
- **M-3** es claramente **favorable como barrera natural**, cumpliendo con la normativa de impermeabilización.

8. CUMPLIMIENTO NORMATIVO

La implantación de un vertedero de residuos inertes no puede analizarse únicamente desde la perspectiva técnica. El marco normativo constituye la base sobre la cual se sustenta cualquier proyecto, garantizando que la instalación se ajusta a la legislación ambiental vigente y a los estándares europeos de protección de la salud humana y del medio ambiente.

Directiva 1999/31/CE de vertederos: establece los requisitos de diseño, explotación y clausura de vertederos en la UE. Es la base sobre la que se desarrollan las normativas nacionales.

RD 1481/2001: trasposición inicial de la Directiva en España. Define las categorías de vertederos, requisitos de impermeabilidad y condiciones de control ambiental.

RD 646/2020: normativa más reciente y actualmente vigente. Establece criterios más exigentes en cuanto a barreras de impermeabilización, gestión de lixiviados, control de pluviales y monitoreo postclausura.

Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados: introduce el concepto de economía circular y refuerza la jerarquía de gestión de residuos. Los vertederos se consideran última opción tras prevención, reutilización y reciclaje.

Directiva Marco del Agua (DMA, 2000/60/CE): obliga a proteger y mejorar el estado de las masas de agua. Por tanto, el vertedero debe demostrar que no pone en riesgo las aguas superficiales ni subterráneas.

Normativa autonómica de Aragón: el Instituto Aragonés de Gestión Ambiental (INAGA) regula la tramitación ambiental y las autorizaciones necesarias.

se tiene por tanto que uno de los puntos más importantes es que este proyecto no solo debe "cumplir la norma", sino anticiparse a ella. Las normativas sobre residuos y medio ambiente evolucionan constantemente hacia criterios más estrictos. Diseñar el vertedero

de Andorra con un margen de seguridad superior al mínimo exigido es clave para garantizar su viabilidad futura.

9. ANÁLISIS DE RIESGOS.

9.1. Marco normativo y metodológico

El análisis de riesgos se apoya en:

- Guía metodológica para la ubicación de vertederos (MITERD, 2023).
- Recomendaciones para ubicación, diseño y vigilancia de vertederos (MITERD, 2023).
- RD 646/2020 y RD 1481/2001, referentes al régimen de eliminación de residuos en vertedero.
- Norma sismorresistente NCSE-02 y zonificación sísmica del IGN.

9.2. Metodología aplicada.

Se analizan los factores condicionantes del emplazamiento (geomorfología, litología, hidrogeología, clima, hidrología, sismicidad). Y en función de esto se ha realizado una clasificación de los riesgos.

Clasificación por tipología:

- Riesgos geológicos y geotécnicos.
- Riesgos hidrológicos e hidrogeológicos.
- Riesgos sísmicos y de inestabilidad.
- Riesgos ambientales y territoriales (distancias, DPH, usos del suelo).

A su vez, se presenta una **evaluación cualitativa de severidad**: escala (Muy bajo / Bajo / Medio / Alto) aplicada a corto plazo (fase de construcción) y largo plazo (explotación y post clausura). Y con el fin de tenerlo más claro se realiza un **Registro sistemático de riesgos** en el que se presentan síntesis en tabla, con origen, justificación y potenciales efectos.

9.3. Identificación y evaluación de riesgos.

9.3.1. Riesgos geológicos y geotécnicos

Subsidencia y karstificación:

La evaluación de los procesos de **subsistencia y karstificación** constituye un requisito fundamental en los **estudios de emplazamiento de vertederos**, según lo establecido en el **Real Decreto 646/2020** y en la **Guía Metodológica para la ubicación de vertederos (MITERD, 2023)**. Ambos documentos establecen que la ubicación de este tipo de instalaciones **no es compatible con terrenos que presenten fenómenos activos de hundimiento**, colapso o disolución, ya que estos procesos comprometen la seguridad estructural del vertedero y aumentan de manera significativa la vulnerabilidad de los acuíferos frente a posibles contaminaciones.

En este contexto, se ha analizado la posible existencia de subsidencia o karstificación en el emplazamiento proyectado en Andorra (Teruel), teniendo en **cuenta los antecedentes geológicos**, los resultados de los sondeos y calicatas ejecutados, así como la información cartográfica y bibliográfica disponible.

La subsidencia se define como **el hundimiento progresivo o repentino de la superficie** del terreno debido a la pérdida de volumen en el subsuelo. Sus principales causas pueden ser naturales o inducidas:

Naturales: disolución de rocas solubles como yesos, sales o halitas; compactación natural de depósitos blandos o arcillosos.

Antrópicas: extracciones mineras, bombeo intensivo de aguas subterráneas o consolidación de rellenos.

Las consecuencias más relevantes para un vertedero incluyen **la aparición de fisuras en las barreras impermeables** (geomembranas, arcillas compactadas), la generación de caminos preferentes **de infiltración de lixiviados** hacia el subsuelo y **la pérdida de estabilidad de taludes** o de la propia superficie de vertido.

En el emplazamiento de Andorra (Teruel), los resultados de los sondeos hasta 15 metros de profundidad **no han mostrado evidencias de procesos de subsidencia activa**. Los materiales predominantes son margas, arcillas y limos de baja permeabilidad, con buena compacidad y sin indicios de vacíos o deformaciones diferidas. La presencia regional de formaciones evaporíticas (halita y epsomita) obliga, no obstante, a **considerar un control específico en fases posteriores**, ya que, en caso de quedar expuestas a la infiltración, podrían desencadenar procesos de disolución lenta.

Presenta, por tanto, un riesgo bajo, condicionado únicamente al control de posibles niveles de evaporitas en fases de ejecución.

La karstificación es el proceso de **disolución de rocas carbonatadas o evaporíticas** (calizas, dolomías, yesos, sales), que da lugar a **cavidades, dolinas, grietas o conductos subterráneos**. En términos hidrogeológicos, este proceso genera una permeabilidad secundaria muy elevada, facilitando **la rápida circulación de agua** y, con ella, la potencial migración de contaminantes hacia los acuíferos.

Las implicaciones de la karstificación en un vertedero son **especialmente graves**:

Aparición de dolinas o hundimientos súbitos, que comprometen la estabilidad de la masa de residuos.

Pérdida de la estanqueidad de la barrera geológica y de las capas de impermeabilización.

Alta vulnerabilidad de los acuíferos por transmisión rápida de lixiviados a través de conductos kársticos.

En el caso del emplazamiento de Andorra (Teruel), los materiales predominantes corresponden a depósitos **terciarios arcillosos, margosos y conglomeráticos**, con baja tendencia a karstificarse. Si bien existen formaciones evaporíticas en la región, **no se han identificado cavidades ni dolinas en la parcela objeto** de estudio ni en su entorno inmediato. La estratigrafía observada en sondeos y calicatas muestra continuidad lateral y ausencia de huecos o conductos disueltos, **lo que descarta procesos kársticos activos** en el área.

Presenta por tanto un riesgo muy bajo, sin evidencias de actividad ni incompatibilidades normativas.

Inestabilidad de taludes:

La inestabilidad de taludes se refiere a la pérdida de equilibrio de las masas de suelo o roca que conforman pendientes naturales o artificiales, **generando deslizamientos, vuelcos, erosiones o caídas de materiales**. En el caso de vertederos, este fenómeno puede afectar tanto a los taludes naturales del terreno como a los taludes creados por la propia operación de vertido, y constituye uno de los **factores críticos a controlar en el diseño y explotación**.

Su análisis es imprescindible en estudios de viabilidad de vertederos, ya que la normativa vigente (RD 646/2020 y Guía MITERD, 2023) **exige garantizar la estabilidad estática y dinámica de los taludes** en condiciones normales y bajo sollicitaciones sísmicas mínimas.

La estabilidad depende de múltiples parámetros geológicos, geotécnicos e hidrológicos, entre los que destacan:

Litología: suelos cohesivos (arcillas, margas) ofrecen resistencia, mientras **que arenas y gravas poco cementadas son más susceptibles a deslizamientos**.

Estructura del terreno: la presencia de **estratificación inclinada** o de planos de debilidad puede **favorecer la inestabilidad**.

Hidrología: **el agua** es un factor clave, ya que incrementa **el peso de los materiales**, reduce la resistencia al corte y puede **generar presiones intersticiales**.

Geomorfología: taludes empinados, ausencia de vegetación y procesos de erosión aceleran la pérdida de equilibrio.

Cargas adicionales: el propio peso de los residuos dispuestos en el vaso ejerce un empuje adicional sobre los taludes.

Esta inestabilidad puede **tener graves consecuencias para la seguridad estructural y ambiental** del vertedero como **roturas locales**, desprendimientos superficiales que comprometen la integridad de la cubierta impermeabilizante, **deslizamientos globales**, fallos de gran volumen que afectan a la masa de residuos, generando desplazamientos súbitos y descontrolados, daños en infraestructuras anexas, **afectación a cunetas**, sistemas de drenaje o caminos de servicio, y **liberación de lixiviados** ya que un fallo estructural puede abrir vías de infiltración o provocar descargas súbitas hacia el entorno.

El objeto de estudio presenta un relieve suavemente ondulado, con pendientes moderadas (<10 %) y **ausencia de laderas inestables activas**. Los sondeos y calicatas han mostrado materiales mayoritariamente arcillosos y margosos, **con buena cohesión y sin planos de debilidad** evidentes. Además, no se ha detectado nivel freático en los primeros 6–8 m, lo cual elimina la posibilidad de **presiones intersticiales** que pudieran desestabilizar los taludes. Por otra parte, el clima semiárido **limita la saturación prolongada de suelos**, aunque los episodios de lluvias torrenciales podrían inducir erosión superficial puntual.

Otra variable a tener en cuenta es la baja sismicidad de la zona ($a_b < 0,04$ g según NCSE-02) lo que **reduce el riesgo de inestabilidad dinámica**.

Todo esto hace que el riesgo de inestabilidad sea **bajo**, condicionado únicamente a la **gestión adecuada de escorrentías** y al **diseño correcto de la geometría de los taludes de explotación**.

9.3.2. Riesgos hidrológicos e hidrogeológicos

Inundabilidad:

La inundabilidad es uno de los factores de **exclusión más relevantes** en la selección de emplazamientos para vertederos. Según el Real Decreto 646/2020 y la Guía metodológica MITERD (2023), está prohibido ubicar vertederos en zonas inundables para periodos de retorno iguales o superiores a 100 años. El objetivo es evitar que la instalación se vea afectada por avenidas fluviales que comprometan su seguridad estructural, provoquen la dispersión de residuos o faciliten la migración de lixiviados hacia el medio receptor.

El riesgo de inundabilidad en la zona del vertedero se ha evaluado a partir de:

- La cartografía oficial del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), a escala $\geq 1:10.000$.
- La identificación de zonas con peligro de anegamiento para distintos periodos de retorno ($T=10, 50, 100$ y 500 años).
- El análisis de la topografía local y la distancia al cauce más próximo (río Martín y sus afluentes secundarios).

El emplazamiento proyectado no se encuentra **en ninguna zona inundable** según el SNCZI, ni siquiera para periodos extremos de **$T=500$ años**. Las áreas de inundación más cercanas se localizan en torno al río Martín, a una distancia la cual no representa una amenaza directa.

Aunque la zona no esté cartografiada como inundable, se pueden considerar algunos riesgos complementarios como **la escorrentía superficial** concentrada durante lluvias torrenciales, favorecida por la escasa cobertura vegetal y la baja capacidad de infiltración de los horizontes arcillosos, **las inundaciones pluviales** locales en caso de acumulación de agua en depresiones sin drenaje adecuado. Y **las aportaciones laterales** desde vaguadas o campos colindantes que podrían afectar a los taludes o vasos de vertido.

El vertedero, cumple plenamente con los requisitos normativos que son:

RD 646/2020, Anexo I: prohíbe la instalación en áreas inundables ($T \geq 100$ años).

Guía MITERD (2023): obliga a verificar mediante cartografía oficial y, en su caso, estudios hidrológicos complementarios.

De esta manera, se entiende que el riesgo de inundabilidad en el emplazamiento de Andorra (Teruel) se considera muy bajo.

Permeabilidad del terreno:

La permeabilidad (k) es la capacidad que tiene un suelo o una roca para permitir el paso del agua a través de sus poros o fisuras. Se expresa en metros por segundo (m/s) y depende de la textura del suelo, la compactación y la presencia de fracturas.

Los áridos que presentan una alta permeabilidad (arenas, gravas), el agua circula fácilmente, lo que provoca un riesgo elevado de que los lixiviados migren hacia acuíferos, y aquellos que presentan una baja permeabilidad (arcillas, margas), el agua apenas se infiltra ya que estos actúan como barrera natural, reduciendo la vulnerabilidad.

La permeabilidad del terreno es uno de los factores más críticos en el diseño y viabilidad de un vertedero, porque condiciona la protección frente a la contaminación de aguas subterráneas. Si la permeabilidad es alta ($k > 10^{-7}$ m/s) los lixiviados podrían infiltrarse en el subsuelo y llegar a acuíferos aumentando el riesgo de contaminación hídrica a medio y largo plazo. El emplazamiento podría ser inviable si no se refuerza con una barrera artificial. Sin embargo, si la permeabilidad es baja ($k \leq 10^{-7}$ m/s), el terreno actúa como barrera geológica natural reduciendo drásticamente el riesgo de migración de lixiviados.

Cumple con los requisitos del RD 646/2020 y de la Guía MITERD (2023), que exigen que el terreno del vaso disponga de baja conductividad hidráulica.

En el terreno de estudio los ensayos Lefranc realizados en los sondeos han mostrado valores de permeabilidad que oscilan entre 10^{-6} y 10^{-8} m/s, disminuyendo con la profundidad. En superficie aparecen tramos con mayor permeabilidad (arenas y gravas sueltas), pero los niveles más profundos están compuestos por margas compactas y arcillas, que ofrecen una excelente impermeabilidad natural.

Esto significa que la base geológica natural del emplazamiento ya cumple en gran medida con las exigencias normativas, aunque será necesario reforzar los estratos superficiales con una barrera artificial ya sea con geomembranas o arcillas compactadas.

Teniendo en cuenta a la composición litológica el riesgo se considera medio-bajo, controlable mediante soluciones de diseño (sellado artificial + drenaje).

9.3.3. Riesgos sísmicos y de inestabilidad dinámica

Sismicidad y riesgo sísmico

Para el riesgo se tiene en cuenta la normativa NCSE-02 (acción sísmica de cálculo), RD 646/2020 (estabilidad y seguridad en vertederos), Guías MITERD 2023 (verificación de susceptibilidad sísmica), y la aceleración sísmica básica la cual es de $a_b < 0,04$ g para Andorra (Teruel) **presentando una peligrosidad baja.**

Se tiene en cuenta para el estudio su sismicidad histórica, **la cual es muy reducida** (eventos menores), sin fallas cuaternarias activas en el entorno.

Riesgos ambientales y territoriales

La contaminación de suelos y aguas en vertederos se produce **cuando los residuos depositados liberan** compuestos que se **infiltran en el terreno** y alcanzan horizontes más profundos o cursos superficiales. Estos contaminantes pueden alterar la calidad del suelo, inutilizarlo para usos agrícolas y comprometer los acuíferos locales.

En el caso del vertedero de Andorra, aunque no **se detectó nivel freático** en los primeros **6–8 m**, sí existen **horizontes superficiales** con limos y arenas que, al saturarse **por lluvias, podrían facilitar flujos localizados de agua contaminada.**

La presencia de limos y arenas en superficie con permeabilidad algo mayor que las margas profundas y la escorrentía concentrada, episodios de lluvias torrenciales pueden arrastrar contaminantes hacia vaguadas o zonas bajas próximas.

se tiene por tanto un nivel de riesgo medio, condicionado al control del diseño. El terreno ofrece una barrera natural adecuada (margas y arcillas), pero los estratos superficiales requieren impermeabilización artificial y drenaje de escorrentía.

Riesgo de generación de lixiviados

Los lixiviados son los líquidos que se generan cuando el agua de lluvia entra en contacto con los residuos depositados en el vertedero. Pueden arrastrar compuestos contaminantes y, si no se controlan, infiltrarse en el terreno.

Aunque en vertederos de residuos inertes los lixiviados suelen ser menos agresivos que en los de residuos urbanos, su generación sigue siendo un riesgo ambiental que se debe controlar.

Pueden generarse, debido al mismo clima semiárido, largos periodos secos favorecen acumulación de polvo y partículas; y a llegar las lluvias torrenciales, estas son arrastradas generando lixiviados más concentrados. la pluviometría anual es baja (≈ 400 mm), pero los episodios intensos de lluvia pueden generar grandes volúmenes de escorrentía en poco tiempo, y la superficie agrícola descubierta al carecer de vegetación densa, el agua de lluvia se infiltra con facilidad en el terreno descubierta del vaso.

Presenta por tanto un riesgo medio-bajo, ya que la baja pluviometría anual limita la generación total de lixiviados, pero los episodios extremos de lluvia constituyen un factor crítico a considerar en el diseño.

Según la normativa RD 646/2020 (Anexo I): se exige la instalación de un sistema de impermeabilización y recogida de lixiviados en el fondo del vaso.

Guía MITERD 2023: establece que debe garantizarse una barrera geológica natural o artificial que limite la permeabilidad a $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s.

RD 1481/2001: exige el control de aguas superficiales y subterráneas mediante seguimiento ambiental.

Por tanto, el riesgo de contaminación de suelos y aguas existe, pero se encuentra reducido por la ausencia de freático somero y la predominancia de margas impermeables en el subsuelo. No obstante, requiere medidas complementarias de impermeabilización y drenaje.

El riesgo de lixiviados es controlable mediante un correcto diseño de cubiertas, recogida y conducción de pluviales, y sistemas de impermeabilización.

En conjunto, ambos riesgos son gestionables y no suponen una limitación para la viabilidad del vertedero, siempre que se cumpla estrictamente la normativa.

9.4 Matriz-resumen de riesgo (Andorra, Teruel)

Riesgo	Situación en Andorra (Teruel)	Corto plazo (construcción)	Largo plazo (operación/pos tclausura)	Severidad
Subsidencia / karstificación	No identificada, evaporitas puntuales	Muy bajo	Bajo (control puntual)	Bajo
Inestabilidad de taludes	Relieve suave, arcillas y margas	Bajo	Medio (si no hay drenaje)	Bajo-Medio
Erosión superficial	Escorrentía intensa ocasional	Medio	Medio	Medio
Inundabilidad	Parcela fuera de zona SNCZI	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Nivel freático	No interceptado <8 m	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Permeabilidad superficial	$k=10^{-6}$ m/s en horizontes someros	Medio	Bajo (con barrera artificial)	Bajo-Medio
Escorrentía superficial	Eventos torrenciales	Medio	Medio	Medio
Sismicidad	ab < 0,04 g, IGN	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo

Tabla ilustrativa de los riesgos, el nivel que representan para la zona proyectada.

9.5. Valoración

La valoración global de riesgos para el vertedero proyectado en Andorra (Teruel) indica un escenario **altamente favorable**, condicionado únicamente por ciertos aspectos locales a gestionar. La **ausencia de nivel freático** somero en los primeros 6–8 m, junto con la baja **conductividad hidráulica de las margas y arcillas** en profundidad, **reduce** significativamente **la vulnerabilidad frente a contaminación subterránea**. La cartografía del SNCZI confirma la inexistencia de afección por zonas inundables incluso para periodos de retorno de 500 años, eliminando restricciones asociadas a riesgos fluviales. La sismicidad baja ($a_b < 0,04$ g) simplifica las verificaciones estructurales y disminuye costes de diseño, garantizando estabilidad geotécnica con medidas convencionales. En contraste, el **factor de mayor sensibilidad es el régimen climático torrencial** propio del área semiárida, que puede inducir procesos puntuales de erosión y generación de escorrentías intensas; **este riesgo debe gestionarse** con sistemas de **drenaje perimetral, sellados superficiales y control de partículas en suspensión**. Asimismo, los riesgos ambientales y territoriales identificados (pérdida de suelo agrícola, impacto paisajístico y percepción social) se consideran **moderados y controlables**, siempre que se implementen medidas de integración, seguimiento piezométrico y gestión de lixiviados conforme a normativa. En conclusión, la combinación de condiciones naturales favorables y riesgos puntuales gestionables permite calificar el emplazamiento como **viable y seguro**, condicionado a la aplicación rigurosa de las medidas de diseño y control ambiental previstas

10. ESTUDIO DE SOLUCIONES.

10.1. Criterios de diseño (anclas normativas)

Barrera geológica o impermeabilización: si la conductividad natural supera los límites, debe ejecutarse **barrera geológica artificial $\geq 0,5$ m** con materiales que cumplan: finos $> 30 \%$, IP 10–30, compactación $\geq 95 \%$ Proctor Mod., sin arcillas expansivas. Sobre ella, capa de impermeabilización (HDPE o GCL) y capa drenante de lixiviados. Verificación de estanqueidad antes de operar.

Gestión de pluviales: **circuito de aguas limpias separado de aguas potencialmente contaminadas**; conducciones perimetrales calculadas para la máxima precipitación 24 h con $T=25$ años (inertes) y balsa de tormentas con esa misma base de proyecto.

Ubicación segura: prohibición en zonas inundables $T \geq 100$ años (inertes) y distancias a embalses/canales (500 m aguas arriba / 250 m aguas abajo para inertes).

Sismicidad: con $a_b < 0,04$ g (Andorra), **la instalación es de baja peligrosidad**; en estos entornos la guía pide análisis sísmico somero (integridad de impermeabilización y estabilidad con acción sísmica).

Alcance del estudio de ubicación: el informe IGME-MITERD valora susceptibilidad (sismo, inundabilidad, movimientos de ladera, aguas subterráneas) y exige cartografía y cortes 1:5.000–1:10.000.

10.2. Soluciones de impermeabilización del vaso y flancos.

Alternativa 1:

Se utilizará arcilla compactada (AC) como barrera principal, de manera que se ejecute una capa de AC (0,5–1,0 m) que aporte $k \leq 10^{-7}$ m/s en conjunto.

Según la normativa es válida como barrera artificial si cumple finos > 30 %, IP 10–30, 95 % PM; espesor mínimo $\geq 0,5$ m (mejor 1,0 m en inertes para robustez).

En el emplazamiento los niveles someros presentan $k \approx 10^{-6}$ m/s; aunque se tiene que por sí sola no garantiza el objetivo si el estrato de apoyo es granular.

Esta opción presenta un bajo coste y huella de carbono si se usa la arcilla local, siempre y cuando esta sea apta; no obstante, esta solución es sensible a fisuración por ciclos seco-húmedo.

Alternativa 2:

Manta de bentonita como elemento impermeable (GCL).

GCL (permeabilidad $\leq 10^{-11}$ m/s) colocado sobre subbase regularizada.

Norma: la guía lo reconoce como capa de impermeabilización (material sintético arcilloso), con estabilidad a ciclos húmedo–seco.

Esta solución presenta una buena compatibilidad con las arcillas del emplazamiento; se deberá tener cuidado respecto al control frente a hidratación y punzonamiento.

Esta solución tiene a su vez como positivo que presenta un auto sellado local; y como contra, necesita geotextiles de protección y control de tensiones.

Alternativa 3:

Geomembrana PEAD (HDPE) 2 mm + geotextiles

Se implementará una lámina HDPE ≥ 2 mm, protegida por geotextiles, como última barrera.

Según la normat UNE 104425, espesor mínimo 2 mm, resistencia química, verificación de estanqueidad antes del vertido (trazadores, prospección eléctrica, etc.).

muy adecuada donde los someros son más permeables; compatible con pendientes de taludes si son texturizadas.

Como punto positivo tiene muy baja permeabilidad efectiva; y como negativo presenta una mayor huella de carbono que AC sola.

Alternativa 4:

Sistema compuesto: AC (≥ 1 m) + GCL o HDPE + drenajes lixiviados

barrera natural (arcillas locales) + barrera artificial (AC $\geq 1,0$ m) + impermeabilización (GCL o HDPE 2 mm) + capa drenante.

Esta es la solución de referencia del RD 646/2020 para garantizar la impermeabilización y controlar la presión de lixiviados.

En el vertedero las (margas y arcillas profundas de $k 10^{-7}$ – 10^{-8} m/s y someros locales 10^{-6} m/s) esta combinación cierra el balance de k con alto margen de seguridad.

Esta solución como pro presenta una mayor robustez y durabilidad; y como negativo presenta un coste intermedio/alto.

Solución

Se marca como solución, la **alternativa 4**, (sistema compuesto) por seguridad hidrogeológica y trazabilidad normativa en un medio con someros moderadamente permeables.

10.3. Soluciones de drenaje de lixiviados

Esquema: capa drenante (grava lavada o geocompuesto drenante) con pendientes internas al 2–3 ‰ hacia sumideros y pozos de recogida; colectores HDPE ranurados.

Separación de redes: lixiviados siempre separados de pluviales; circuito independiente hasta balsa de lixiviados.

Verificación previa: ensayo de impermeabilización efectiva antes de verter (art. 11.3 RD 646/2020).

Conclusión 2 (lixiviados): Red de drenaje específica, con geocompuesto para reducir sobrecarga y favorecer mantenimiento.

10.4. Soluciones de gestión de aguas pluviales

Alternativa 1: Conducciones perimetrales + balsa única de retención

Se plantea la construcción de cunetas perimetrales que recogen toda el agua de escorrentía y la conducen hacia una única balsa de retención, desde la cual se regula su vertido.

Ventajas: diseño sencillo, bajo coste de ejecución y fácil mantenimiento.

Inconvenientes: mezcla de aguas limpias con aguas potencialmente contaminadas, lo que aumenta el volumen de agua que debe tratarse como lixiviado.

Alternativa 2: Separación de circuitos (aguas limpias vs. contaminadas)

Se propone un establecimiento de dos sistemas diferenciados:

Aguas limpias (sin contacto con residuos) → derivadas a cunetas perimetrales y balsas de tormenta impermeabilizadas.

Aguas contaminadas (en contacto con residuos) → conducidas directamente a la balsa de lixiviados para su gestión.

Ventajas: disminuye de forma significativa el volumen de lixiviados generados, reduce costes de tratamiento y mejora la eficiencia hidráulica.

Inconvenientes: mayor inversión inicial y necesidad de control estricto de la separación de flujos.

Alternativa 3: Cubierta temporal y progresiva de celdas

Se propone cubrir con geosintéticos o capas de suelo impermeable las zonas del vaso no operativas, reduciendo la infiltración directa de pluviales en los residuos.

Ventajas: minimiza notablemente la generación de lixiviados, mejora la estabilidad de taludes y reduce dispersión de partículas.

Inconvenientes: requiere un programa de gestión dinámica de coberturas y un coste adicional en materiales.

Alternativa 4: Infiltración controlada mediante zanjas filtrantes

Se busca derivar parte de las aguas limpias hacia zanjas de infiltración en áreas no vinculadas al vaso.

Ventajas: favorece la recarga natural del suelo, es una solución sostenible y de bajo coste.

Inconvenientes: en episodios de lluvias torrenciales puede no ser suficiente; riesgo de arrastre de sedimentos hacia zonas agrícolas.

Valoración y selección de la alternativa más viable

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas de Andorra (precipitación baja, pero con episodios torrenciales), la ausencia de nivel freático somero y los requisitos normativos del RD 646/2020 y de la Guía MITERD (2023), la solución más viable es la Alternativa 2: separación de circuitos.

Esta opción permite diferenciar claramente las aguas limpias, que solo requieren almacenamiento temporal y control de calidad antes del vertido, de las aguas contaminadas, que deben gestionarse como lixiviados. Por lo que se reduce el volumen de lixiviados, disminuyendo los costes de gestión a lo largo de la vida útil del vertedero.

Por otro lado, se cumple con los criterios normativos de impermeabilización y protección de aguas superficiales y subterráneas.

10.5. Estabilidad de taludes y control de erosión

La estabilidad de taludes en un vertedero es un factor esencial para garantizar la seguridad estructural de la instalación, evitar deslizamientos y minimizar procesos erosivos. En el emplazamiento de Andorra (Teruel), la litología predominante (arcillas y margas compactas) es favorable desde el punto de vista geotécnico, pero la presencia de niveles superficiales limo-arenosos y la acción de lluvias torrenciales pueden generar inestabilidades locales si no se adoptan medidas adecuadas.

Alternativa 1: Diseño de taludes suaves (1V:3H – 1V:2,5H)

Se plantea una ejecución de taludes con pendientes reducidas, garantizando un ángulo de inclinación inferior al ángulo de fricción natural de los materiales.

Ventajas: alta seguridad frente a deslizamientos, menor erosión superficial y mejor integración paisajística.

Inconvenientes: mayor ocupación de terreno y, por tanto, menor capacidad volumétrica del vaso.

Alternativa 2: Refuerzo con bermas intermedias

Se propone la incorporación de bermas horizontales cada cierta altura ($\approx 5-7$ m) que actúan como descansos estructurales y facilitan el drenaje superficial.

Ventajas: mejora la estabilidad global, facilita la revegetación y reduce la longitud de deslizamiento potencial.

Inconvenientes: incremento en la complejidad constructiva y ligera pérdida de volumen útil.

Alternativa 3: Revestimiento superficial con geosintéticos y drenaje

Se propone cubrir taludes con geomembranas o geotextiles, combinados con sistemas de drenaje superficial que conduzcan el agua hacia cunetas perimetrales.

Ventajas: protección frente a erosión hídrica y eólica, mejora del control de escorrentía y reducción de infiltración hacia los taludes.

Inconvenientes: coste adicional en materiales y mantenimiento periódico de los geosintéticos.

Alternativa 4: Estabilización biotécnica (revegetación controlada)

se tiene como idea la aplicación de hidrosiembra o plantación de especies autóctonas resistentes a la sequía en taludes, para favorecer la cohesión superficial del suelo.

Ventajas: solución sostenible, mejora la integración paisajística, reduce la erosión y el polvo.

Inconvenientes: tiempo de implantación de la vegetación y dependencia de las condiciones climáticas locales (semiáridas).

Selección de la alternativa más viable

El análisis geotécnico y normativo (RD 646/2020 y Guía MITERD 2023) exige que los taludes de un vertedero garanticen su estabilidad en condiciones estáticas y sísmicas mínimas. En Andorra, la litología compacta permite adoptar soluciones de diseño relativamente sencillas.

La Alternativa 1 (taludes suaves) aporta la mayor seguridad geotécnica, pero reduce la capacidad del vaso.

La Alternativa 2 (bermas intermedias) optimiza la estabilidad y favorece el drenaje, siendo un estándar en vertederos modernos.

La Alternativa 3 (geosintéticos) es adecuada como refuerzo frente a erosión hídrica y eólica, especialmente útil en episodios torrenciales.

La Alternativa 4 (revegetación) es una medida complementaria clave para la sostenibilidad y el control de erosión a largo plazo.

La solución más recomendable para el vertedero de Andorra es la combinación de taludes suaves con bermas intermedias (Alternativas 1 y 2), reforzados en zonas críticas con revestimiento geosintéticos y complementados con revegetación biotécnica progresiva. Este enfoque mixto ofrece el mejor equilibrio entre estabilidad estructural, capacidad útil del vaso, integración paisajística y sostenibilidad ambiental.

11. CONCLUSIÓN

A la vista de los resultados obtenidos en la campaña de sondeos, calicatas y ensayos, considero necesario reforzar las condiciones naturales del emplazamiento con medidas constructivas adicionales.

En primer lugar, aunque los materiales profundos presentan valores de permeabilidad muy bajos (del orden de 10^{-7} – 10^{-8} m/s), en niveles superficiales se han identificado gravas y arenas limosas con k ligeramente superior a lo exigido por normativa. Por ello, **recomiendo disponer siempre una barrera de impermeabilización complementaria en el fondo del vaso**. Esta puede ejecutarse con **arcilla compactada** proveniente de préstamos locales, o bien mediante geosintéticos (GCL o geomembrana PEAD de 2 mm), en línea con lo establecido en el RD 646/2020 y las Recomendaciones MITERD (2023). De este modo se garantiza que, incluso en el caso de heterogeneidades en los materiales, la seguridad frente a infiltraciones quede sobradamente cubierta.

En segundo lugar, se hace imprescindible **la implantación de un sistema de recogida y drenaje de aguas pluviales**. El clima de Andorra se caracteriza por periodos largos de sequía combinados con lluvias torrenciales muy intensas. Esta irregularidad puede generar escorrentías concentradas que, de no ser controladas, acabarían infiltrándose hacia el vaso. Por ello, estimo que deben ejecutarse cunetas perimetrales, canales de desvío y balsas de tormenta dimensionadas para eventos extremos, con separación clara entre el circuito de aguas limpias y el de aguas potencialmente contaminadas.

Finalmente, en los horizontes más superficiales, se han detectado niveles colgados en materiales limo-arcillosos tras episodios de lluvia. Si bien no representan un acuífero continuo, sí pueden acumular agua y afectar a la estabilidad local de los taludes. Recomendando, por tanto, **prever sistemas de drenaje o reconducción** que eviten la acumulación de agua en estos niveles y que mantengan las condiciones geotécnicas estables a lo largo del tiempo.

Más allá de la fase constructiva, considero que la clave del éxito de este vertedero estará en la monitorización continua de su comportamiento.

En este sentido, propongo la **instalación de piezómetros** de control en puntos **estratégicos aguas arriba y aguas abajo del emplazamiento**. Aunque en los sondeos no se interceptó el nivel freático hasta 15 m de profundidad, la única manera de demostrar a largo plazo la no afección de acuíferos es con una **red piezométrica** que permita registrar datos de manera periódica.

También deben realizarse controles **periódicos de permeabilidad en la barrera de sellado**, así como revisiones de la estabilidad de taludes y de la cubierta final. Esto no solo es una exigencia normativa, sino que constituye una garantía para la administración y la población cercana de que el vertedero funciona dentro de los parámetros previstos.

Además, creo importante llevar un registro detallado **de precipitaciones, escurrimiento y comportamiento hídrico del vertedero**. Relacionar estos datos con la aparición de humedades puntuales o con variaciones de caudal en el sistema de lixiviados permitirá anticipar problemas y corregirlos de manera temprana.

Tras todo el análisis realizado, mi valoración es clara: el emplazamiento propuesto en Andorra (Teruel) reúne condiciones muy favorables para albergar un vertedero de residuos inertes.

Geológicamente, la presencia de margas y arcillas compactas de muy baja permeabilidad constituye una barrera natural excelente.

Hidrogeológicamente, la ausencia de nivel freático somero refuerza la seguridad, minimizando la posibilidad de contaminación de aguas subterráneas.

Desde el punto de vista geomorfológico y climático, aunque existen condicionantes como las lluvias torrenciales y los niveles colgados, estos pueden gestionarse con soluciones constructivas adecuadas.

Normativamente, se cumplen los criterios exigidos por el RD 1481/2001, el RD 646/2020 y las guías MITERD (2023) en cuanto a impermeabilización, ubicación y vigilancia.

En definitiva, considero que el emplazamiento no solo es viable, sino que, con la implementación de las recomendaciones expuestas, se convierte en una opción óptima y segura, capaz de garantizar la protección del medio ambiente y la sostenibilidad del proyecto a lo largo de toda su vida útil y en la fase de post clausura

12. CONSIDERACIONES DE DESARROLLO SOSTENIBLE.

El presente estudio, cuyo objetivo es evaluar la idoneidad del emplazamiento en Andorra (Teruel) para la construcción de un vertedero de residuos inertes, contribuye de forma directa a diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Agenda 2030. A continuación, se detallan los ODS más relevantes y la forma en que este trabajo se alinea con sus metas específicas.

ODS 6 Agua limpia y saneamiento

Meta 6.3: Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando vertidos y minimizando la liberación de sustancias peligrosas.

El estudio analiza la presencia y profundidad del nivel freático, así como la permeabilidad del terreno, con el fin de minimizar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. La ausencia de un nivel freático dentro de la profundidad investigada y la baja conductividad hidráulica de los materiales garantizan una protección natural para los recursos hídricos.

ODS 11 Ciudades y comunidades sostenibles

Meta 11.6: Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la gestión de residuos.

La correcta ubicación de un vertedero de residuos inertes contribuye a una gestión ordenada y segura de los residuos de construcción y demolición, evitando emplazamientos inadecuados que puedan generar impactos negativos en la población y el medio ambiente.

ODS 12 Producción y consumo responsables

Meta 12.4: Lograr la gestión ambientalmente racional de los productos químicos y desechos durante todo su ciclo de vida.

Este estudio forma parte de una planificación estratégica que asegura la disposición final de residuos inertes en un emplazamiento seguro, minimizando riesgos y favoreciendo una gestión responsable y sostenible de los residuos.

ODS 13 Acción por el clima

Meta 13.1: Reforzar la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales.

La selección de un emplazamiento no inundable, estable y con baja permeabilidad, incrementa la resiliencia de la instalación frente a eventos climáticos extremos, evitando la liberación de lixiviados y la erosión de taludes.

ODS 15 Vida de ecosistemas terrestres

Meta 15.1: Garantizar la conservación, restauración y uso sostenible de los ecosistemas terrestres.

La elección de un emplazamiento que evita zonas de alto valor ecológico y que presenta barreras naturales contra la contaminación protege la biodiversidad y conserva el equilibrio de los ecosistemas locales.

El vertedero de Andorra (Teruel) incorpora criterios que lo hacen compatible con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo relativo a protección de aguas, adaptación al clima, restauración ambiental y gestión responsable de residuos.

En mi opinión, la clave es que este proyecto no solo resuelve un problema de gestión de residuos, sino que también se plantea como una infraestructura sostenible y resiliente, integrada en el territorio y diseñada para minimizar riesgos ambientales a corto y largo plazo.

Bibliografía

- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea* (Vol. I–II). Barcelona: Ed. Omega.
- Fabre, J. (1964). Le calcul des essais de perméabilité à charge constante et variable dans les forages. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(6), 875–882.
- Gobierno de España. (2001). *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. Boletín Oficial del Estado, nº 25, 3233–3246.
- Gobierno de España. (2011). *Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*. Boletín Oficial del Estado, nº 181, 87405–87454.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2023). *Mapa Geológico de España 1:50.000 (Hoja de Andorra, Teruel)*. Madrid: IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2023). *Cartografía hidrogeológica y estudios geológicos para la cuenca del Ebro*. Madrid: IGME.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). (2023). *Guía metodológica para la realización de estudios de ubicación de proyectos de vertederos*. Madrid: MITERD.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). (2023). *Recomendaciones para la ubicación, diseño y vigilancia de vertederos (Versión 1.1, junio 2023)*. Madrid: MITERD.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) & Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). (2022). *Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI): Cuenca del Ebro*. Zaragoza: CHE.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (2022). *Mapa de peligrosidad sísmica de España (2ª ed.)*. Madrid: IGN.
- Jiménez Salas, J. A., Justo Alpañés, J. L., & Serrano, A. (1981). *Geotecnia y Cimientos* (Vol. I–II). Madrid: Rueda.
- Torrijo, J. (2024). *Trabajos geotécnicos para planta de residuos inertes en Andorra (Teruel)*. Informe interno de IGEOREM.