

ANEJO Nº 4 GEOLOGÍA, GEOTECNIA E HIDROGEOLOGÍA

ANEJO Nº 4 GEOLOGÍA, GEOTECNIA E HIDROGEOLOGÍA**INDICE**

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETO.....	2	6	COMPARATIVA ENTRE SOLUCIONES	19
1.1	OBJETO DEL ESTUDIO INFORMATIVO.....	2	6.1.1	Índice de aprovechamiento de tierras.....	19
1.2	OBJETO DEL PRESENTE ANEJO.....	2	6.1.2	Índice de capacidad portante.....	19
2	UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2	6.1.3	Índice de excavabilidad	20
2.1	UBICACIÓN	2	6.1.4	Índice de agresividad al hormigón	20
2.2	DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA ACTUACIÓN ESTUDIADA	2	6.1.5	Índice de expansividad	20
3	DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS ANALIZADAS. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	3	6.1.6	Índice de estabilidad de desmontes.....	20
3.1	ALTERNATIVA 0. E.I. APROBADO 2004 CASTEJÓN - PAMPLONA.....	3	6.1.7	Índice de estabilidad de rellenos	20
3.2	ALTERNATIVA 1. NUEVO E.I. CONEXIÓN EN EL ENTORNO DE CASTEJÓN.....	3	6.1.8	Índice de acuíferos	20
4	MARCO GEOLÓGICO	4	6.1.9	Valoración de las formaciones geológicas.....	20
4.1	FUENTES DE INFORMACIÓN	4	6.1.10	Valoración geológico-geotécnica de las Alternativas.....	23
4.2	GEOLOGÍA	4	7	ESTUDIO DE MATERIALES.....	23
4.3	ESTRATIGRAFÍA	5	7.1.1	Necesidad de materiales.....	23
4.3.1	Terciario (T ₁)	5	7.1.2	Materiales procedentes de la traza	26
4.3.2	Cuaternario	5	7.1.3	Préstamos	26
4.3.3	Rellenos antrópicos.....	6	7.1.4	Graveras y canteras	26
4.4	GEOMORFOLOGÍA.....	6			
4.5	HIDROGEOLOGÍA.....	7			
4.6	TECTÓNICA.....	8			
4.7	SISMICIDAD	8			
4.8	PUNTOS DE INTERÉS GEOLÓGICO (PIG).....	9			
5	GEOTECNIA	10			
5.1	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	10			
5.1.1	Unidad 1. Terciario	10			
5.1.2	Unidad 2. Depósitos granulares de Terraza y Suelos de Glacis	11			
5.1.3	Unidad 3. Depósitos cohesivos de Terraza	11			
5.1.4	Unidad 4. Vertidos y rellenos antrópicos incontrolados	12			
5.2	RIESGOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS	12			
5.3	GEOTECNIA DEL MOVIMIENTO DE TIERRAS	15			
5.3.1	Desmontes	15			
5.3.2	Rellenos	16			
5.4	GEOTECNIA DE CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS	19			

APÉNDICE

PLANO GEOLÓGICO

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO

1.1 OBJETO DEL ESTUDIO INFORMATIVO

El objeto del presente “Estudio Informativo de la Conexión Ferroviaria de la Línea de Alta Velocidad Castejón-Pamplona en el entorno de Castejón de Ebro” es analizar y determinar la solución óptima para la conexión ferroviaria, en el entorno de Castejón, de las obras de la Línea de Alta Velocidad Castejón-Comarca de Pamplona (obras de plataforma, de vía doble, parcialmente construidas), con la línea convencional ferroviaria en servicio Casetas-Bilbao, con el fin de poder llevar a cabo la puesta en servicio del tramo de Alta Velocidad Castejón-Pamplona con anterioridad a la construcción de los tramos de alta velocidad anterior (Zaragoza-Castejón, Estudio Informativo en redacción en el momento actual) y posterior.

Para la definición de esta conexión se parte del antecedente inmediato constituido por la solución dada a esta conexión en el E.I. Castejón – Comarca de Pamplona (y denominada **Alternativa 0** en el presente documento), tramitado ambientalmente y aprobado en 2004 (se remite al apartado de antecedentes), analizándose los nuevos condicionantes ambientales surgidos tras la Declaración de Impacto Ambiental (en concreto ampliación de espacios de la Red Natura 2000), al tiempo que se compatibiliza dicha circunstancia con la definición de una infraestructura más eficiente, limitando su envergadura a lo estrictamente necesario (solución concretada en la denominada **Alternativa 1** en este documento) El presente Estudio, por tanto, tiene por objeto realizar el análisis justificativo y de definición de una optimización de la solución antecedente que cuenta con aprobación.

1.2 OBJETO DEL PRESENTE ANEJO

El presente anejo se redacta al objeto de determinar los aspectos geológico-geotécnicos e hidrogeológicos más relevantes de la zona de estudio para las Alternativas de Trazado propuestas, a la hora de minimizar los riesgos geotécnicos que pudieran afectar a su mantenimiento en el tiempo y permitan su integración en el medio sin afcción al mismo.

2 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

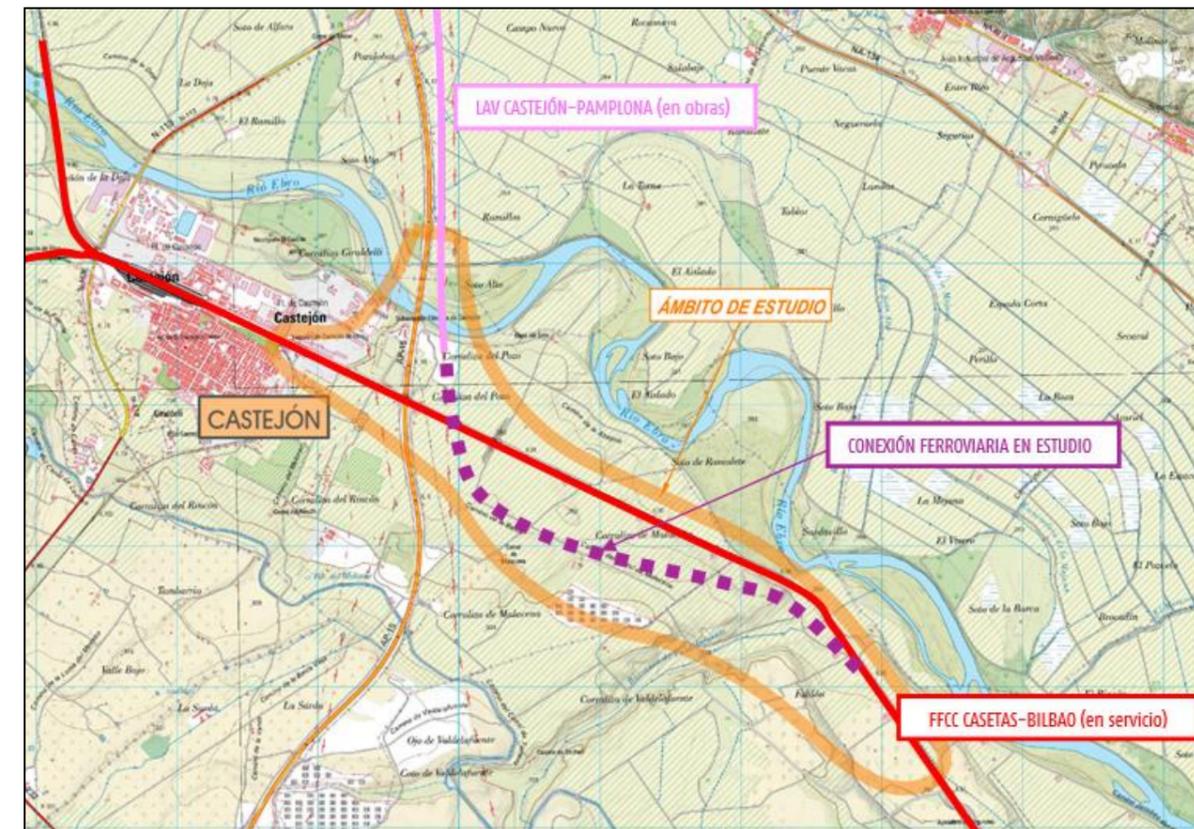
2.1 UBICACIÓN

El ámbito de estudio se define en la Comunidad Foral de Navarra, en los términos municipales de Castejón y Tudela, cercano al núcleo del primero. Se sitúa próximo al río Ebro, en un entorno con varias infraestructuras viarias y ferroviarias (existentes o/y previstas).

Como se ha indicado anteriormente, el objeto del Estudio es analizar y determinar la solución óptima para la conexión ferroviaria, en el entorno de Castejón, de las obras de la Línea de Alta Velocidad Castejón-Comarca de

Pamplona (obras de plataforma, de vía doble, parcialmente construidas), con la línea convencional en servicio Casetas-Bilbao, con el fin de poder llevar a cabo la puesta en servicio del tramo de Alta Velocidad Castejón-Pamplona con anterioridad a la construcción de los tramos de alta velocidad anterior (Zaragoza-Castejón, Estudio Informativo en redacción en el momento actual) y posterior.

Se presenta a continuación un plano de situación con la delimitación del ámbito de estudio.



2.2 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA ACTUACIÓN ESTUDIADA

La actuación corresponde con un trazado ferroviario de vía única, previsto para ancho de vía convencional, 1.668 mm, electrificada que conecte la Línea de Alta Velocidad Castejón-Comarca de Pamplona (obras de plataforma, de vía doble, parcialmente construidas), con la línea convencional en servicio Casetas-Bilbao.

Se estudian dos Alternativas:

- Alternativa 0: la denominada Alternativa 0 considerada de partida se corresponde con la solución prevista en el EI aprobado en 2004.

Como se ha indicado, han surgido nuevos condicionantes con posterioridad a la aprobación de la correspondiente Declaración de Impacto Ambiental (en particular la ampliación de espacios de la Red Natura 2000 que resultarían afectados con dicha solución).

Supone el mantenimiento sin modificaciones de la línea actual en servicio Casetas-Bilbao, por lo que se agregaría en el territorio un nuevo corredor ferroviario correspondiente a la citada Alternativa 0.

- **Alternativa 1:** constituye una reconsideración de los condicionantes actuales que permite evitar la afección a los espacios de ampliación de la Red Natura surgidos tras la aprobación de la D.I.A. y que al mismo tiempo define una infraestructura más eficiente, limitando su envergadura a lo estrictamente necesario.

En este escenario se elimina parte de la vía actual en servicio Casetas-Bilbao, de modo que el nuevo eje ferroviario de conexión objeto del Estudio se hace acompañar de una rectificación de la vía actual en servicio. Bajo esta Alternativa, el territorio se vería surcado por un solo eje ferroviario en el que se agrupase la línea actual (levemente rectificadas) y el nuevo eje de conexión objeto del presente Estudio.

El final de la actuación objeto de estudio, aspecto común a las dos Alternativas estudiadas, se corresponde con el estribo de inicio del Viaducto de cruce sobre el río Ebro que se encuentra redactado a nivel de Proyecto de Construcción y que ha sido tramitado con la Confederación Hidrográfica del Ebro.

3 DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS ANALIZADAS. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

3.1 ALTERNATIVA 0. E.I. APROBADO 2004 CASTEJÓN – PAMPLONA

En el caso de la Alternativa 0, como se ha indicado, queda identificada como la situación que correspondería a adoptar la solución aprobada en el E.I. Castejón – Comarca de Pamplona (2004) para esta conexión.

El origen de la actuación se encuentra sobre la vía en servicio Casetas-Bilbao en el término municipal de Tudela, en la alineación previa a la de llegada a la estación de Castejón. A partir de dicho punto, el nuevo trazado para el eje de vía única se segrega hacia el sur (margen izquierda de la vía actual en sentido Tudela-Castejón), de modo que cruza sobre el barranco de Valdelafuente. Dicho barranco y su entorno ha sido clasificado como perteneciente a la Zona de Especial Conservación ZEC del Río Ebro y afluentes, con posterioridad a la etapa de tramitación ambiental del citado El aprobado.

A continuación, tras este cruce el trazado se orienta hacia el norte para retomar la alineación de la LAV Castejón-Comarca de Pamplona, concretamente alcanzando el estribo sur del viaducto de cruce sobre el río Ebro que constituye el final de la actuación.

Cabe señalar que en el territorio se localizan algunas vías pecuarias coincidentes en su recorrido con caminos agrícolas. En la definición de esta solución se ha tenido en cuenta la continuidad de los caminos agrícolas interceptados y, en particular, la de las vías pecuarias. La reposición de las mismas, representada en Planos de manera diferenciada, se ha hecho coincidir en la medida de lo posible aprovechando el itinerario de caminos agrícolas existentes, al objeto de no mermar la disponibilidad del suelo agrícola que flanquea la actuación.

El ramal de conexión así definido tiene una longitud de unos 5 kilómetros y contemplaría la previsión de las siguientes estructuras para permeabilidad territorial:

- PS 1 Paso Superior de Camino (PK 1+000)
- PS 2 Paso Superior de Camino (PK 2+200)
- Viaducto sobre el Barranco de Valdelafuente, L=30 m.
- Viaducto de cruce sobre el Ferrocarril Casetas-Bilbao y caminos de servicio (PK 4+400), L= 82 m.

En esta Alternativa se mantiene sin modificaciones la línea ferroviaria actual Casetas-Bilbao, de modo que el territorio quedaría atravesado por dos corredores ferroviarios.

3.2 ALTERNATIVA 1. NUEVO E.I. CONEXIÓN EN EL ENTORNO DE CASTEJÓN

La Alternativa 1, como se ha indicado, constituye una reconsideración de los condicionantes actuales que permite evitar la afección a los espacios de ampliación de la Red Natura surgidos tras la aprobación de la DIA y que al mismo tiempo define una infraestructura más eficiente, limitando su envergadura a lo estrictamente necesario.

El origen de la actuación se encuentra sobre la vía en servicio Casetas-Bilbao en el término municipal de Tudela, en la alineación de llegada a la estación de Castejón. A partir de dicho punto, el nuevo trazado para el eje de vía única se segrega hacia el sur (margen izquierda de la vía actual en sentido Tudela-Castejón). Este origen de la actuación hace que no se cruce el barranco de Valdelafuente, a diferencia de la situación prevista en el Alternativa 1, por lo que no se afecta la zona clasificada como Zona de Especial Conservación ZEC del Río Ebro y afluentes, con posterioridad a la etapa de tramitación ambiental del citado El aprobado.

A continuación, tras este cruce el trazado se orienta hacia el norte para retomar la alineación de la LAV Castejón-Comarca de Pamplona, concretamente alcanzando el estribo sur del viaducto de cruce sobre el río Ebro que constituye el final de la actuación.

Cabe señalar que en el territorio se localizan algunas vías pecuarias coincidentes en su recorrido con caminos agrícolas. En la definición de esta solución se ha tenido en cuenta la continuidad de los caminos agrícolas

interceptados y, en particular, la de las vías pecuarias. La reposición de las mismas, representada en Planos de manera diferenciada, se ha hecho coincidir en la medida de lo posible aprovechando el itinerario de caminos agrícolas existentes, al objeto de no mermar la disponibilidad del suelo agrícola que flanquea la actuación.

El ramal de conexión así definido tiene una longitud de unos 3 kilómetros y contemplaría la previsión de la siguiente estructura para permeabilidad territorial:

- PS 1 Paso Superior de Camino y Vía Pecuaria Ramal de la Malacena (PK 1+400)

En este escenario se elimina parte de la vía actual en servicio Casetas-Bilbao (desmantelándose parte del mismo), de modo que el nuevo eje ferroviario de conexión objeto del Estudio se hace acompañar de una rectificación de la vía actual en servicio. Bajo esta Alternativa, el territorio se vería surcado por un solo eje ferroviario en el que se agrupase la línea actual (levemente rectificadas) y el nuevo eje de conexión objeto del presente Estudio. Como consecuencia de la remodelación funcional ferroviaria descrita, se evita el cruce del ramal de conexión de nuevo trazado sobre la vía convencional actual, lo que evita la necesidad de una nueva estructura y reduce el movimiento de tierras global de la actuación.

Este trazado cuenta con menor recorrido, evitando el cruce con el Barranco de Valdelafuente que forma parte del ZEC, puesto que conecta con la vía existentes antes de alcanzar esta zona. Además, conlleva el poder liberar una parte del recorrido del ferrocarril actual y proceder a su desmantelamiento y restauración o reversión al uso que se estipule.

4 MARCO GEOLÓGICO

4.1 FUENTES DE INFORMACIÓN

El Gobierno de Navarra contempló la redacción de diversos proyectos a través del Protocolo, firmado en Pamplona en mayo de 2009, donde se acordó el marco general y la metodología para el desarrollo de la cooperación entre el Ministerio de Fomento, la Administración de la Comunidad Foral de Navarra, el Consorcio "Alta Velocidad-Comarca de Pamplona" y el ADIF, para la redacción de los proyectos, construcción y financiación de las obras de la Nueva Red Ferroviaria en la Comarca de Pamplona y Nueva Estación de Alta Velocidad de Pamplona.

De acuerdo a la documentación consultada, en la elaboración de este Anejo se han utilizado las siguientes fuentes de información:

- Estudio Informativo Complementario: Corredor Cantábrico-Mediterráneo de Alta Velocidad. Tramo: Zaragoza-Castejón. Subtramo: Tudela-Castejón (Navarra). Fase 2. Estudio Informativo Complementario. PRORAIL (Mayo, 2013).

- Proyecto de Construcción de "Plan Navarra-2012: Actuación Prioritaria; Corredor Cantábrico-Mediterráneo de Alta Velocidad. Tramo: Castejón-Comarca de Pamplona. Subtramo: Castejón-Cadreita. Plataforma". SAITEC (Junio, 2011).
- Instituto Geológico y Minero de España. Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja nº 282. Tudela.
- Instituto Geológico y Minero de España. Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Hoja nº 244. Alfaro.
- Instituto Geológico y Minero de España. Mapa Geológico de España. Escala 1:200.000. Hoja nº 22. Tudela.
- Instituto Geológico y Minero de España. Mapa Geotécnico de España. Escala 1:200.000. Hoja nº 22. Tudela.
- Instituto Geológico y Minero de España. Mapa Hidrogeológico de España. Escala 1:200.000. Hoja nº 22. Tudela.

4.2 GEOLOGÍA

A grandes rasgos, el ámbito de estudio se encuadra dentro de la Cuenca Continental Cenozoica del Ebro que se extiende al sur de la Sierra de Alaiz (Navarra). Se pueden diferenciar dos grandes grupos: el Cuaternario continental del río Ebro (depósitos fluviales) y el sustrato Terciario de la Cuenca Cenozoica del Ebro. Estas formaciones litoestratigráficas implicadas en el entorno del E.I. se describen a continuación.

1. Sustrato terciario

- Arcillas, limos y yesos (Formación Lerín) y arcillas, limos rojos con calizas lacustres y areniscas (Formación Tudela). Los materiales de estas formaciones presentan un bajo o moderado contenido en sales solubles, contenido elevado en sulfatos (Formación Lerín) y bajo contenido en carbonato.

2. Formaciones superficiales cuaternarias del sistema aluvial Ebro-Aragón:

- Sistema de terrazas medias y bajas. Formadas por gravas polimícticas con niveles de limos y arcillas con lentejones de arena. La potencia de los depósitos oscila entre 3 y 5 metros. El contenido en sulfatos solubles es bajo a moderado y el de materia orgánica inferior al 0,5% (M.O <0,5%).
- Conos de deyección. Afloramientos aislados y muy reducidos, en planta presentan forma de abanico, localizándose en la desembocadura de barrancos y arroyos hacia la llanura aluvial del río Ebro.
- Cauces y meandros abandonados. Son depósitos de arcillas con pasadas arenosas y de gravas, situadas en zonas inundables de meandros abandonados del río Ebro.
- Aluvial de fondo de valle. De morfologías alargadas y estrechas, rellenando los pequeños barrancos y arroyos que circulan hacia los ríos principales.

- Aluvial del cauce y llanura inundación actuales del río Ebro. Ocupan las zonas más deprimidas del valle del Ebro, con una superficie plana, anchura aproximada de 500 metros y potencia entre 2 y 4 metros.

3. Materiales antrópicos:

- Rellenos antrópicos controlados y parcialmente controlados. Rellenos estructurales de vías de comunicación lineal, explanaciones de edificación y canalizaciones.
- Vertidos antrópicos. Rellenos de antiguas explotaciones de extracción de áridos total o parcialmente explanadas, así como vertederos de restos inorgánicos y orgánicos.

4.3 ESTRATIGRAFÍA

4.3.1 Terciario (T)

El **Terciario** se reconoce, únicamente, en ambos márgenes del Barranco de Valdelafuente (Alternativa 0) donde se identifica la denominada Formación Lerín y, puntualmente, la Formación Tudela aunque esta última no llegará a ser intersecada.

Formación Lerín. Aparece constituida por una alternancia de arcillas calcáreas con pasadas limosas y yesos formando niveles bien definidos. Los yesos se disponen en forma de finas capas (milimétricas a centimétricas) o capas más gruesas (a escala decimétrica) de yeso sacaroideo blanco. Forman secuencias donde se alternan, de forma rítmica, capas bien estratificadas de unos 10 a 15 mm de yesos terrosos, grisáceos, yesos fibrosos y arcillas yesíferas, con unas tonalidades pardo-amarillentas y grises que le dan al conjunto una estructura hojosa característica. Esporádicamente se observan bancos de areniscas poco cementadas y bastante yesíferas.

Formación Tudela. Se apoya sobre la Formación Lerín y se encuentra representada por una unidad arcillosa y calcárea, con un predominio claro de la primera, de tonos pardoamarillentos a rojizos. Las capas de caliza, menos importantes en la base, se van haciendo más potentes y densas hacia techo pudiendo superar los 2 m de espesor. Intercaladas entre las arcillas se encuentran también algunos niveles de areniscas muy calcáreas con cemento carbonatado y, en general, de baja compactación.

4.3.2 Cuaternario

Sobre las formaciones terciarias se han desarrollado extensamente los depósitos superficiales cuaternarios del Pleistoceno-Holoceno. Cabe distinguir, a grandes rasgos, dos tipos fundamentales en el ámbito de estudio: terrazas aluviales en sentido amplio y depósitos de glaciares.

Terrazas fluviales

Asociadas al río Ebro se pueden distinguir numerosos niveles de terraza, con ciertas dificultades para su diferenciación y delimitación ya que, por un lado, aparecen frecuentemente alteradas y deformadas, además de no presentar un desarrollo líneas constante y, por otro, las modificaciones antrópicas que eliminan los desniveles de los escarpes en numerosos puntos y enmascaran sus resaltes morfológicos.

A modo de síntesis, a lo largo de ambas Alternativas, se han diferenciado tres conjuntos de terrazas: terrazas pleistocenas, terraza alta holocena y terraza baja holocena.

Terrazas Pleistocenas (Q_{tp})

Representan las terrazas superiores más antiguas, de edad pleistocena, agrupadas en una única unidad y que afectarán únicamente a la Alternativa 0. En detalle se diferencian en la bibliografía dos niveles de terraza: uno situado entre los 10-30 m sobre el río Ebro y el otro a los 30-50 m.

Ambos niveles se encuentran formados, principalmente, por gravas con arenas y ocasionales limos/arcillas en la parte más superficial. Las gravas se presentan, en ocasiones, con un elevado grado de compactación y cementación por carbonatos.

Terraza Alta Holocena (Q_{ta})

La terraza alta holocena constituye el principal escalón de asentamiento humano, debido a su desarrollo y quedar fuera de las crecidas del Ebro. Se encuentra entre los +7 y los +14 m sobre el nivel del río y conformada, litológicamente, por gravas calcáreas y cuarcíticas con intercalaciones arenosas y limosas, de tamaño medio (8 cm) con matriz calcarenítica y escaso cemento de naturaleza calcomargoso. Puede presentar niveles encostrados, denominados "mallacán" en la terminología local, aunque menos abundantes que en las terrazas pleistocenas, así como intercalaciones limo-arenosas en el seno de los materiales granulares.

Sobre estos materiales de terraza alta holocena se dispone la práctica totalidad del trazado de la Alternativa 1 y los últimos 2 km de la Alternativa 0.

Terraza Baja Holocena (Q_{tb})

Este nivel de terraza, dado el escarpe morfológico existente en la margen derecha del río, no llega a desarrollarse en la zona por donde discurren ambas Alternativas. Por ello, el final de la actuación objeto de estudio, aspecto común a las dos Alternativas estudiadas, se desarrolla sobre los suelos de terraza alta holocena y que se corresponde con el estribo de inicio del Viaducto de Cruce sobre el río Ebro.

La terraza baja, muy bien representada en la margen izquierda del río Ebro en este área, aparece constituida frecuentemente por unos 2 a 4 m de suelo cohesivo limoso sobre gravas poligénicas con contenido variable de matriz limoarenosa. Se dispone entre los +0 y los +7 m sobre el nivel del río, constituyendo su lecho de inundación secular actual y no se encuentra cementada.

Depósitos de ladera tipo glacis (Q_g)

Presentan una génesis eminentemente geomorfológica, favorecida por los relieves preexistentes de suave pendiente, donde los principales condicionantes han sido los fenómenos de arroyada, la energía de transporte y la naturaleza del área origen.

Estos glacis son relativamente abundantes, desarrollándose a partir de las terrazas aluviales antiguas y los relieves producidos por los materiales terciarios. En ambas Alternativas los glacis de erosión se han generado a partir de las terrazas pleistocenas superiores.

Se encuentran formados por gravillas y gravas brechoides, calcáreas o poligénicas de pequeño tamaño (6 cm), con abundante matriz limo-arcillosa y con cementación variable carbonatada. Normalmente las gravas suelen estar bien redondeadas por los cantos de terraza de los que proceden. Los tramos más distales de los glacis pueden representar niveles encostrados y pueden llegar a alcanzar un espesor importante.

4.3.3 Rellenos antrópicos

Se distinguen, por un lado, los rellenos antrópicos controlados asociados a los terraplenes de las vías de comunicación existentes y, por otro, los vertidos malos características geotécnicas.

Los rellenos asociados a las vías de comunicación presentan unas buenas características geotécnicas dado su control de compactación y puesta en obra. No obstante, existen toda una serie de vertidos incontrolados y rellenos de antiguas explotaciones de extracción de áridos, total o parcialmente explanadas, de muy bajas características geotécnicas y capacidad portante.

Así, hacia el final de ambas Alternativas, junto el estribo de inicio del Viaducto de Cruce sobre el Río Ebro, existe una serie de parcelas donde se aprecia la acumulación de vertidos y rellenos de diferente procedencia que pudieran corresponder a los trabajos de restauración y relleno de una antigua explotación o extracción de áridos con fines constructivos.

En la figura adjunta se muestran dos imágenes históricas de Google Earth del año 2000 y 2022 que evidencian estas labores.

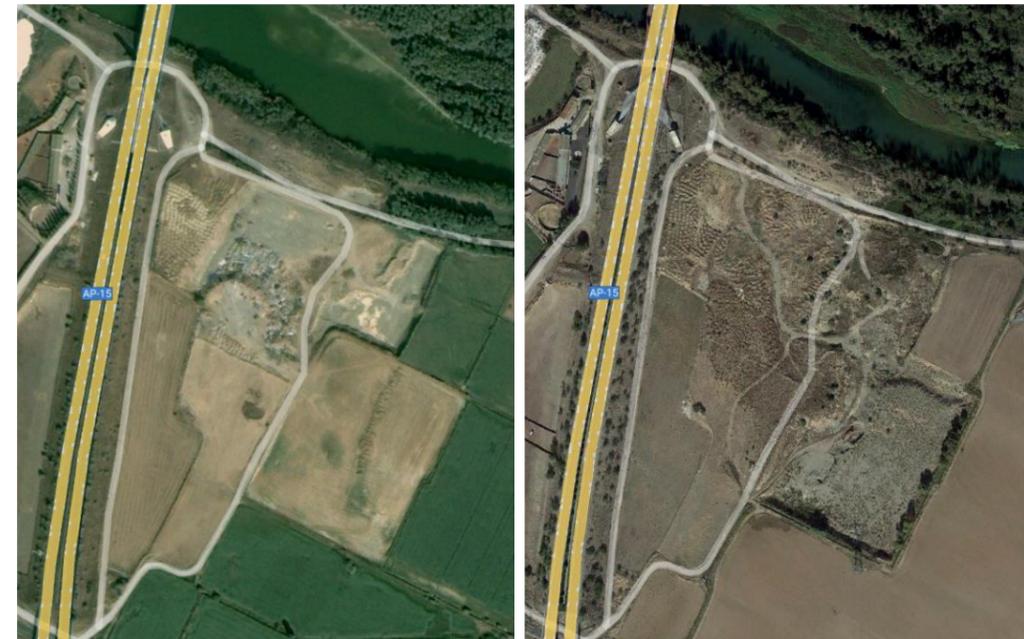


Figura 1. Imágenes Google Earth al final de ambas Alternativas, junto el estribo del Viaducto sobre el río Ebro, donde se aprecian vertidos y rellenos antrópicos incontrolados. A la izquierda imagen histórica del año 2000 y, a la derecha, del año 2022.

4.4 GEOMORFOLOGÍA

La morfología de la región está influenciada por la erosión laminar, la acción fluvial, eólica y los procesos de disolución interna que se mantienen activos en la actualidad.

En el valle del Ebro se distinguen varias plataformas o áreas llanas elevadas, correspondientes a los niveles carbonatados que coronan las series terciarias. Estas se disponen con buzamiento subhorizontal, ligeramente basculadas hacia el río Ebro quedando fuera del ámbito estudiado. A partir de estos niveles calcáreos se desarrolla una serie de glacis dispuestos, en general, sobre materiales blandos (arcillas o margas yesíferas) o sobre terrazas (gravas y arenas). Los glacis de acumulación más bajos y las terrazas altas pueden presentar costras calcáreas de exudación (caliches), denominadas "mallacán" en la terminología local, que pueden haberse desarrollado en épocas secas y cálidas durante el Pleistoceno y el Holoceno.

Las terrazas fluviales que forman la llanura central del Valle, tanto las del río Ebro como las de sus afluentes, presentan un escalonamiento desde las de edades más antiguas, situadas a cotas altas con respecto al nivel de los ríos, hasta las más modernas correspondientes a las terrazas situadas en áreas próximas a los cursos fluviales. Estas terrazas corresponden a diversas series de deposición. Las terrazas antiguas, pleistocenas, suelen estar modificadas por un glacis de erosión en tanto que el escalón superior de la terraza alta holocena (Q_{ta}) constituye el principal lugar de asentamiento humano. El escalón inferior o terraza baja holocena corresponde a la llanura de inundación secular,

donde se reconocen trazados de antiguos meandros y lagunas de brazos abandonados (semilunares). Este nivel de terraza más bajo no llegará a ser afectado por las Alternativas propuestas.

Por otra parte, el valle es frecuentemente asimétrico, circulando el río próximo al borde de la llanura fluvial, dando lugar a escarpes con numerosos cantiles y deslizamientos o desprendimientos de suelos o rocas blandas.

4.5 HIDROGEOLOGÍA

La Confederación Hidrográfica del Ebro define, en la zona de estudio, una única Unidad Hidrogeológica denominada **Aluvial del Ebro: Lodosa-Tudela**. Los estudios hidrogeológicos posicionan un nivel freático regional a una cota de unos 10-20 m de profundidad. En proyectos de vías de comunicación, el nivel freático se sitúa entre los 3 y 5 m en las zonas de terraza baja. Según datos extraídos del IGTE la zona se caracteriza, hidrogeológicamente, por los siguientes tipos de formaciones:

- Formaciones detríticas y cuaternarias de permeabilidad alta o muy alta asociadas al río Ebro y su entorno más cercano.
- Formaciones detríticas y cuaternarias de permeabilidad media que ocupan la mayoría del territorio más allá del aluvial del Ebro.
- Formaciones generalmente impermeables o de muy baja permeabilidad asociadas a los terciarios cohesivos.

En los Planos de este documento se presenta una cartografía geológica de la zona de estudio donde se comprueba que, únicamente, en la Alternativa 0 y a lo largo de las márgenes del Barranco de Valdelafuente, el trazado se dispone sobre los materiales terciarios. Las Alternativas propuestas discurren, por tanto, en su práctica totalidad, sobre los sistemas de terrazas pleistocenas y terrazas altas del río Ebro.



Figura 2. Vista general del Barranco de Valdelafuente

En el ámbito de detalle de la zona de estudio se pueden caracterizar hidrogeológicamente las siguientes zonas:

- Los depósitos terciarios son impermeables en general, pudiendo aumentar la permeabilidad en zonas puntuales donde aparezcan tramos más granulares. El drenaje se ve favorecido por la escorrentía superficial.
- Las facies detríticas terciarias presentan una permeabilidad que varía desde semipermeable a impermeable en función del contenido de finos principalmente. El drenaje superficial es favorable debido a fenómenos de escorrentía e infiltración, mientras que el superficial se ve obstaculizado por la naturaleza arcillosa de la formación.
- Los depósitos cuaternarios de ladera presentan una permeabilidad alta que puede verse disminuida en función del grado de cementación y finos que presente. El drenaje es favorable debido a fenómenos de percolación y a la escorrentía existente. La porosidad suele ser de tipo intergranular.
- Las terrazas altas y medias, al estar bastante cementadas y en algunos casos presentar una costra calcárea, resultan semi a impermeables. A esto se añade la posición elevada de estos depósitos con respecto a los cauces principales que, al quedar colgados, pierden el agua acumulada con relativa rapidez y suelen constituir acuíferos de poca entidad.
- Por el contrario, las terrazas bajas y la llanura aluvial del río Ebro, que no llegarán a ser atravesadas por los trazados proyectados, presentan una elevada permeabilidad y conforman acuíferos con una permeabilidad alta.

Desde un punto de vista hidrogeológico los materiales más interesantes, por tanto, son los que constituyen las terrazas bajas y llanura aluvial del río Ebro. El conjunto aluvial de terraza baja constituye una secuencia vertical relativamente sencilla, compuesta por gravas y arenas gruesas sin consolidar en la base, que pasan a limos y arcillas en la parte superior. Sin embargo, a pesar de esta sencillez de partida, la compleja y diversa dinámica fluvial provoca muy frecuentes cambios laterales de facies y la existencia de paleocauces y meandros abandonados rellenos de sedimentos más finos, así como barras de acreción lateral que dan lugar a una considerable heterogeneidad litológica en la distribución de los materiales.

Las características hidrodinámicas del acuífero presentan una distribución espacial sumamente irregular. En general, los valores de transmisividad disminuyen hacia los bordes de la terraza baja y media debido a la mayor frecuencia de fracciones finas y/o a la disminución del espesor saturado de acuífero, mientras que los máximos corresponden a la parte central del acuífero.

La unidad Aluvial del Ebro y sus afluentes está formada por los depósitos aluviales de los ríos Ebro, Aragón, Cidacos, Arga, Ega, Alhama, Queiles y Huecha que constituyen la terraza inferior y media de los mismos, muchas veces

conectadas, así como los rellenos de valle y algunos glacis. La anchura de estos terrenos permeables oscila en los ríos principales entre 2 y 6 Km, pudiendo llegar a los 8 Km cuando las terrazas están conectadas. Se trata de acuíferos libres y heterogéneos con el agua situada muy cerca de la superficie, a una media de 4 m de profundidad, pudiendo oscilar entre los 0,5 y los 10-15m. El espesor de los acuíferos es muy variable, oscilando entre unos pocos metros y los casi 50 m en la confluencia de los grandes ríos Arga-Aragón y Ebro.

La recarga de estos acuíferos se realiza por tres vías: infiltración procedente de lluvia directa o zonas impermeables próximas, infiltración por excedentes de riego e inundaciones por desbordamiento de los ríos y almacenamiento de las riberas en épocas de fuertes crecidas. La descarga se realiza por fuentes o por conexiones directas con el lecho del río.

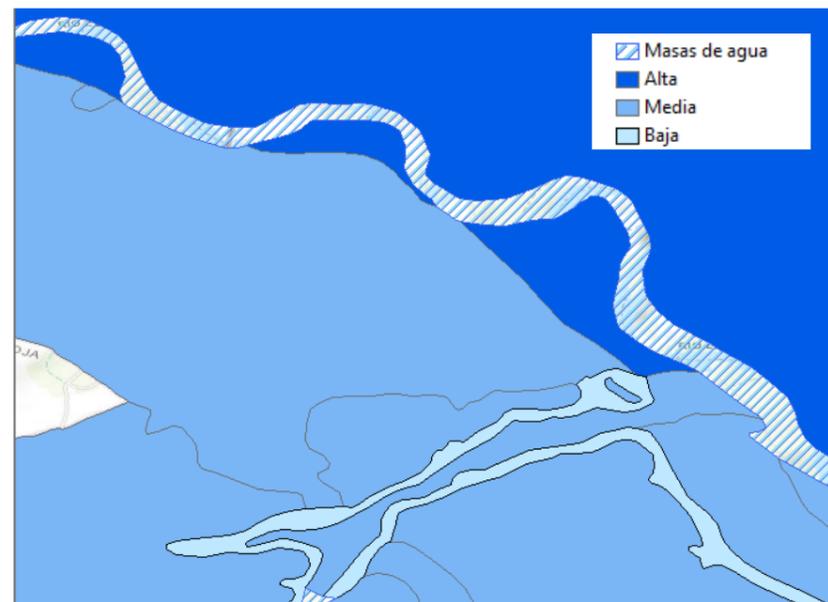


Figura 3. Mapa de permeabilidades

Los principales problemas geotécnicos relacionados con la hidrogeología de la zona son los asociados a los fenómenos de disolución en el sustrato de los tramos yesíferos y, en consecuencia, los posibles fenómenos de subsidencia y colapso. También hay que tener en cuenta los elevados contenidos en sulfatos de las aguas freáticas y la variabilidad de los niveles de agua asociados a las variaciones estacionales.

Incidir aquí, que las Alternativas planteadas no se desarrollan sobre los suelos de terraza baja y, además, dada la ausencia de desmontes de entidad que pudieran afectar a la posición del nivel freático, así como obras subterráneas, pantallas o elementos estructurales previstos que pudieran generar una barrera para la libre circulación del agua en el seno de estos suelos, **no se considera que los diseños de las Alternativas propuesta afecte, en manera alguna, a los acuíferos en la zona.**

4.6 TECTÓNICA

El Terciario Continental se presenta, en general, formando una serie sensiblemente horizontal o monoclinal con buzamientos muy suaves, del orden de 2º a 3º grados hacia el eje del Ebro.

Pese a la escasa deformación de las formaciones terciarias pueden aparecer algunos fenómenos, no tectónicos, de tipo halocinético, que motivan la aparición de variaciones estructurales en los materiales terciarios y, por consiguiente, sobre los suelos cuaternarios superiores:

- Deformaciones asociadas a los procesos de disolución y karstificación en yesos pudiendo llegar a producir, en ocasiones, incluso el colapso o hundimiento de las capas suprayacentes. Estos procesos pueden estar funcionando en la actualidad y también ser antiguos o estar fosilizados por sedimentos más tardíos.
- Deformaciones asociadas al cambio de fases anhidrita-yeso y al paso de glauberita a yeso y a mirabilita, que producen distorsiones a nivel local en los estratos sedimentarios evaporíticos, al incrementarse notablemente el volumen por hidratación.

4.7 SISMICIDAD

Según datos el Mapa de Peligrosidad Sísmica de España (CNIG 2012), para un periodo de retorno 475 años, probabilidad de excedencia 10 % en 50 años, el nivel queda en el ámbito del E.I. entre 0,04-0,05 lo que supone unos niveles bajos.

Por otro lado, aportando información del Plan Especial de Protección Civil ante el Riesgo Sísmico en la Comunidad Foral de Navarra, SISNA, la zona se define con un nivel de intensidad bajo (V-VI) corroborando los datos anteriores.

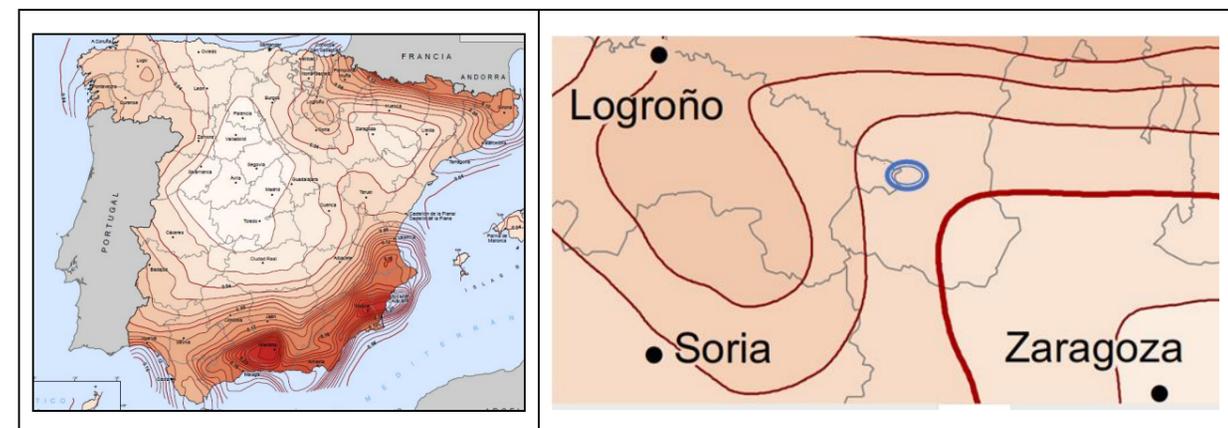


Figura 4. Niveles de peligrosidad sísmica de la Península y detalle del entorno del E.I. (óvalo azul). Fuente CNIG 2012.

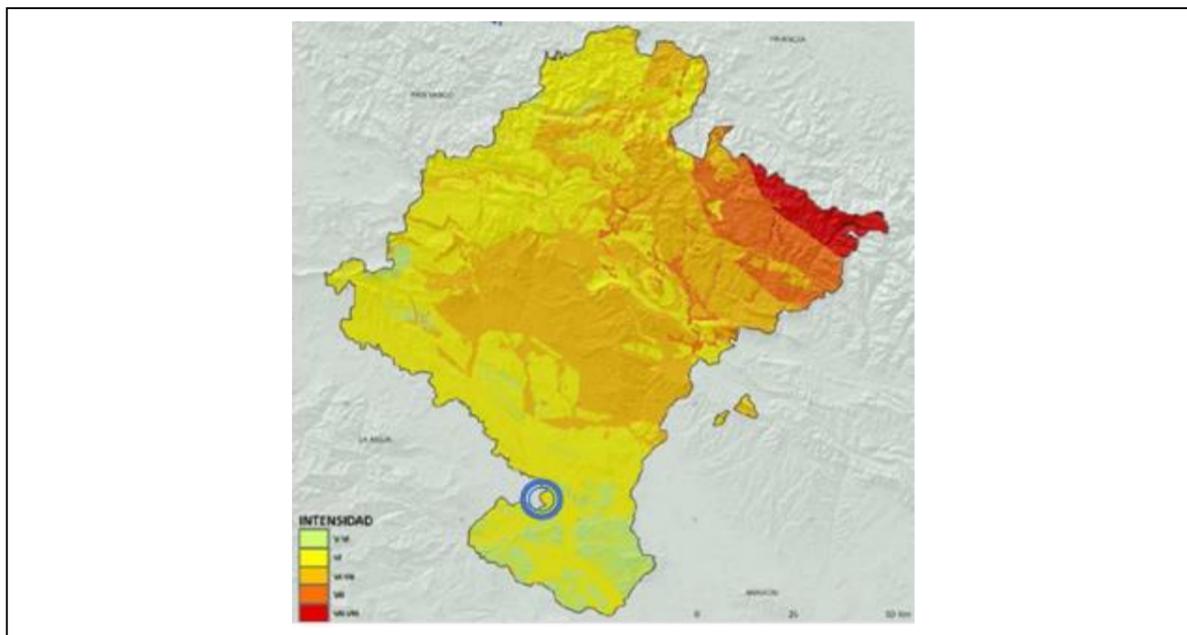


Figura 5. Niveles de intensidad sísmica de Navarra y ubicación aproximada del E.I. (óvalo azul). Fuente SISNA.

El proyecto, como cualquier infraestructura que se viera afectada por un sismo, sería a priori muy vulnerable al suceso y en función de su magnitud. No obstante, al tratarse de un hecho con poca probabilidad de ocurrencia, así como realizarse el diseño de la infraestructura de conformidad con la normativa vigente sismorresistente, hace predecir que la vulnerabilidad del proyecto a los sismos sea baja en la zona.

En caso poco probable de producirse sismos, podrían generar problemas de distinto grado dependiendo evidentemente de la intensidad del mismo, con posibles daños en la plataforma, vía, etc. que conforman la conexión, pudiéndose producir también algún accidente sobre el tráfico ferroviario. En paralelo, las afecciones sobre los valores y población del entorno dependerán igualmente de su magnitud y de la densidad poblacional de la zona concretamente afectada que, en el ámbito de las Alternativas, se puede considerar un factor importante dada la proximidad del núcleo de Castejón.

En caso de que se produjese un fenómeno de este tipo, los principales impactos serían producidos de modo directo por el propio suceso y no tanto por la influencia de éste sobre la vía. Los elementos estructurales ferroviarios pueden recaer sobre distintos elementos del medio afectando en mayor medida a la población, el patrimonio cultural en su caso y los bienes con valor económico; en el medio natural, y ante las características antrópicas del entorno, el daño se centraría en el Barranco de Valdelafuente, parte del ZEC Río Ebro, por afección a la calidad del agua, la vegetación e indirectamente la fauna o el paisaje.

Cabe señalar, además, que el ámbito estudiado (T.M. Castejón y Tudela) se encuentra en el dominio de la Península Ibérica en el que la aceleración sísmica básica (a_b) es menor de 0,04 veces la aceleración de la gravedad ($a_b < 0,04g$). Según las Normas de Construcción Sismorresistente (Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02) y Puentes (NCSP-07), (Real Decreto 637/2007 de 18 de mayo, BOE núm. 132, de 2 de Junio de 2007), cuando se cumple esta condición no resulta necesaria la consideración de las acciones sísmicas en el movimiento de tierras ni en el cálculo estructural.

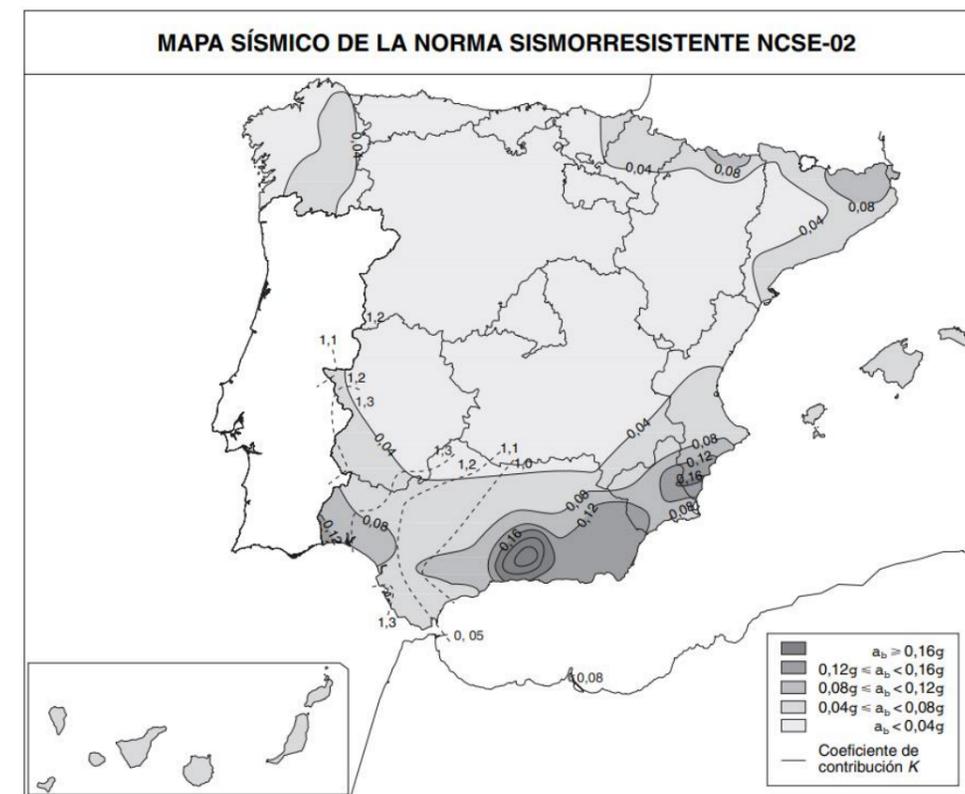


Figura 6. Mapa de Peligrosidad Sísmica. Norma de Construcción Sismorresistente (NCSR-02)

4.8 PUNTOS DE INTERÉS GEOLÓGICO (PIG)

Únicamente se localiza en las proximidades de la actuación un "Punto de Interés Geológico" denominado *PIG Barras fluviales y meandros en los Sotos de Alfaro*. Como se observa en la imagen, se sitúa muy alejado del ámbito de estudio (Oeste del núcleo de Castejón).

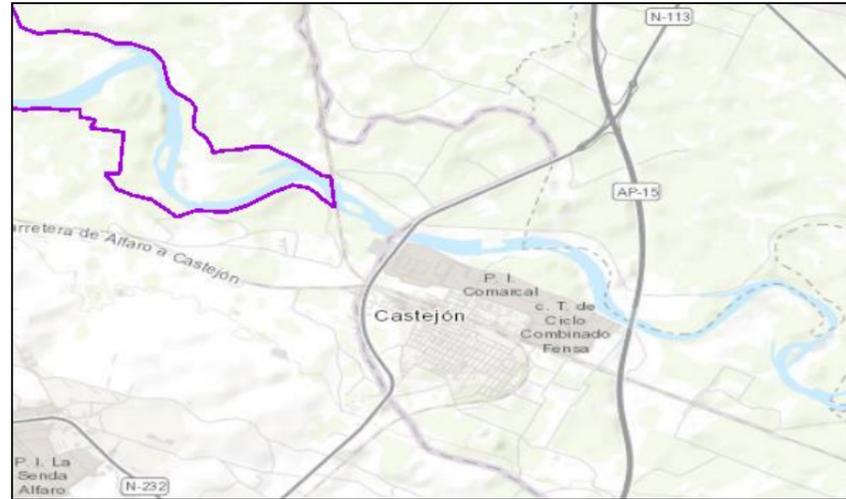


Figura 7. PIG Barras fluviales y meandros de los Sotos de Alfaro

5 GEOTECNIA

5.1 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

El objetivo general, desde el punto de vista geotécnico del movimiento de tierras, consiste en evaluar las Alternativas proyectadas, fijar los taludes de desmonte y relleno, estimar los medios de excavación necesarios y el aprovechamiento del material resultante, así como elaborar las recomendaciones de índole geotécnica relacionadas con la construcción atendiendo a las características geotécnicas de los distintos materiales involucrados.

Igualmente, para la geotecnia de estructuras, se observan toda una serie de materiales sobre los que se apoyarán las cimentaciones de las distintas estructuras: suelos cuaternarios y sustrato terciario. Con base a la naturaleza y características de estos materiales se indican unas consideraciones generales de la tipología de cimentación y medidas o procesos constructivos recomendados.

La diferenciación y caracterización geotécnica de los distintos materiales, dada la ausencia de una campaña específica para este Estudio Informativo, se ha basado en la recopilación de los datos procedentes de los estudios previos efectuados en la zona, la revisión de la bibliografía y literatura técnica en el ámbito de estudio, así como la experiencia de TPF-GETINSA-EUROESTUDIOS en materiales similares.

Así, se han distinguido las siguientes unidades geotécnicas sobre las que se proyectan la Alternativa 0 y Alternativa 1:

- Unidad 1: Depósitos Terciarios
- Unidad 2: Depósitos granulares de Terraza y Suelos de Glacis

- Unidad 3: Depósitos cohesivos de Terraza
- Unidad 4: Rellenos antrópicos y vertidos

5.1.1 Unidad 1. Terciario

Como se ha comentado anteriormente el **Terciario** se reconoce, únicamente, en ambas márgenes del Barranco de Valdelafuente (Alternativa 0) donde se identifica, en mayor medida, la denominada Formación Lerín.

Se trata, en general, de materiales con un elevado contenido en finos (del orden del 80-90%) poco plásticos, clasificados según Casagrande como arcillas CL y puntualmente ML.

El contenido en carbonatos varía entre el 5-35% y el contenido en sulfatos oscila entre el 0,1%-12%, con un promedio del orden del 3-4%; por lo que se pone de manifiesto, según se indicaba en apartados anteriores, la presencia de yesos en el seno de la Formación Lerín.

Según la N.A.V. 2-1-00 de ADIF, para la clasificación geotécnica de suelos, este grupo se cataloga como Q50 debido a su elevado contenido en sulfatos y no sería apto para la configuración de rellenos. No obstante, en caso que la presencia de yeso fuera menor o se realizase un tratamiento previo a su puesta en obra, podrían reutilizarse en la formación de terraplenes.

Se trata de depósitos de elevada compacidad (suelos duros a rocas blandas) con buenas características resistentes y deformacionales.

Unidad 1. Terciario	
Litología	Arcillas y limos duros de baja plasticidad (CL) Presencia de sulfatos. Agresividad. En superficie, meteorizadas, potencial expansivo bajo-medio
Drenaje	Impermeable, lo que favorece el desarrollo de arroyada y la erosión
Desmontes	Taludes no superiores a 3H:2V, en condiciones favorables Taludes provisionales de obra 1H:1V o incluso superiores
Excavabilidad	Excavable mediante métodos mecánicos convencionales
Uso de materiales	Calidad de suelo Q50
Apoyo de rellenos	Capacidad portante media-alta
Cimentaciones estructuras	Directas

Tabla 1. Caracterización Geotécnica Unidad 1

5.1.2 Unidad 2. Depósitos granulares de Terraza y Suelos de Glacis

La mayor parte de las alternativas se desarrollan sobre ellos. Se encuentran formados por gravas poligénicas, cuarcíticas y a veces calcáreas con intercalaciones arenosas y limosas, de tamaño medio (8 cm) con matriz calcarenítica y cemento escaso calcomargoso. Puede presentar niveles encostrados, denominados "mallacán" en la terminología local, más frecuentes en las terrazas antiguas, así como intercalaciones limo-arenosas.

Su clasificación según la USCS muestra que se trata de materiales gruesos con matriz arcillo limosa (GM-GC) de baja plasticidad. No presentan problemas por su contenido en sulfatos (promedio 0,07%) ni problemas de hinchamiento.

Presentan buenas características para su reutilización en muy diferentes usos, con una densidad Próctor modificado media de 2,17 t/m³ y un CBR prácticamente siempre superior a 20 (para el 100% del Próctor) y con una media de 82. Son clasificables como QS3 previo lavado de finos. El material natural se cataloga, al menos, como QS1-QS2.

Admiten inclinaciones de talud medias, en torno al 1H:1V a 3H:2V, con capacidad portante alta para el apoyo de rellenos y media para estructuras.

Teniendo en cuenta los ensayos recopilados en campañas anteriores, pueden resumirse las características geotécnicas del grupo geotécnico del siguiente modo:

Unidad 2. Depósitos granulares de terraza y suelos de glacis	
% finos (pasa #200)	19,1
Límite Líquido (%)	24,8
Límite Plástico (%)	17,2
Índice de Plasticidad (%)	7,6
Clasificación USCS	GM-GC
Clasificación HRB	A-2-4(0)
Humedad natural (%)	5,6
Materia orgánica (%)	0,5
Sulfatos (%)	0,07
Carbonatos (%)	9,7
Próctor modificado (densidad/humedad)	2,17/6,2
CBR 100%	82
Hinchamiento CBR (%)	0,33

Tabla 2. Parámetros geotécnicos Unidad 2

Unidad 2. Depósitos granulares de terraza y suelos de glacis	
Litología	Gravas poligénicas (GM-GC) de bajas plasticidad
Drenaje	Permeable, buen drenaje
Desmontes	Taludes no superiores a 3H:2V en situación permanente Taludes provisionales de obra 1H:1V
Excavabilidad	Excavable mediante métodos mecánicos convencionales Puntualmente ripable ("mallacán")
Uso de materiales	Calidad de suelo QS1 a QS2 sin tratamiento
Apoyo de rellenos	Capacidad portante media-alta
Cimentaciones estructuras	Capacidad portante media. Directas

Tabla 3. Caracterización Geotécnica Unidad 2

5.1.3 Unidad 3. Depósitos cohesivos de Terraza

Bajo esta denominación se incluyen los limos y arcillas que recubren, principalmente, los suelos de terraza alta. Aparecen constituidos en su mayoría por arcillas, en general de baja plasticidad, clasificadas esencialmente como suelos tipo CL según Casagrande.

Las arcillas pueden presentar sulfatos, habiéndose registrado algún valor superior al 2%, y puntualmente, cierto potencial expansivo.

Podrían ser aprovechables únicamente como núcleo de terraplén (Tipo QS1) y en función de su contenido en sales o yesos. Su densidad Próctor modificado media es de 1,85 g/cm³ y su CBR de 8, presentando un hinchamiento del 2,4% en este ensayo. Deberán preverse taludes tendidos, del orden del 3H:2V a 2H:1V, siendo fácilmente erosionables. Su capacidad portante para el apoyo de terraplenes y cimentaciones de estructuras dependerá de la altura de los rellenos y cargas de trabajo de las estructuras aunque, en general, baja y asientos de cierta entidad.

A raíz de la información consultada y experiencia en estos suelos se incluyen las siguientes características geotécnicas para esta unidad:

Unidad 3. Depósitos cohesivos de terraza	
% finos (pasa #200)	85,4
Límite Líquido (%)	34,9
Límite Plástico (%)	20,2
Índice de Plasticidad (%)	14,7
Clasificación USCS	CL
Clasificación HRB	A-6 (10)
Humedad natural (%)	18,0
Densidad natural (t/m ³)	2,1
Materia orgánica (%)	0,55
Sulfatos (%)	0,63
Carbonatos (%)	25,5
Próctor modificado (densidad/humedad)	1,86/13,3
CBR 100%	8
Hinchamiento CBR (%)	2,4

Tabla 4. Parámetros geotécnicos Unidad 3

Unidad 3. Depósitos cohesivos de terraza	
Litología	Arcillas y limos de baja plasticidad (CL) Presencia de sulfatos. Agresividad Bajo potencial expansivo
Drenaje	Permeabilidad baja
Desmontes	3H:2V a 2H:1V, con problemas de erosionabilidad
Excavabilidad	Excavable mediante métodos mecánicos convencionales
Uso de materiales	Calidad de suelo QS1 Núcleo de terraplén en función el contenido en yesos
Apoyo de rellenos	Capacidad portante baja
Cimentaciones estructuras	Capacidad portante baja

Tabla 5. Caracterización Geotécnica Unidad 3

5.1.4 Unidad 4. Vertidos y rellenos antrópicos incontrolados

Estos materiales representan los depósitos de peores características geotécnicas. Se trata de suelos de diferente naturaleza, composición y procedencia de baja capacidad portante y se localizan hacia el final del trazado de ambas Alternativas, junto el estribo del Viaducto de Cruce del Río Ebro.

Esta zona, de acuerdo a la información disponible, podría corresponder a una antigua extracción de áridos que, posteriormente, ha sido parcialmente rellenada con materiales de restos de productos y desechos de obras localizadas en sus proximidades. Los espesores, en función de las tareas de extracción realizadas, podrían alcanzar los 5-8 m.

Unidad 4. Vertidos y rellenos antrópicos incontrolados	
Litología	Variable en función de su origen y procedencia Contenido variable en yesos. Agresividad
Drenaje	Permeabilidad alta
Desmontes	2H:1V, con problemas de erosionabilidad
Excavabilidad	Excavable mediante métodos mecánicos convencionales
Uso de materiales	Vertedero. En función de su naturaleza y procedencia
Apoyo de rellenos	Deberán preverse sustituciones o tratamientos del terreno
Cimentaciones estructuras	Se descarta cualquier apoyo sobre estos suelos

Tabla 6. Caracterización Geotécnica Unidad 4

5.2 RIESGOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

Con base a toda la información disponible, entre los posibles **riesgos geológico-geotécnicos** cabría señalar los siguientes:

- Presencia de yesos en los depósitos terciarios (Formación Lerín) con posible disolución y procesos de karstificación en función de la continuidad y potencia de los niveles yesíferos asociados e intercalados entre las arcillas. Igualmente, en el seno de los suelos cohesivos superficiales de terraza, se detectan contenidos elevados en sulfatos que se traduce en suelos con cierta agresividad.
- Posibilidad de cierto potencial de hinchamiento en las arcillas alteradas terciarias, más superficiales y meteorizadas, así como en los suelos cohesivos de terraza.
- Erosionabilidad media-alta en las formaciones arcillosas y desprendimientos locales de cantos en los suelos granulares de terraza o glacia por degradación de la matriz que los soporta. Regueros de erosión en la superficie limo-arcillosa y arenosa de los taludes que pueden producir aterramientos de cunetas.
- Agresividad de las aguas freáticas en los hormigones de cimentación.
- El producto de la excavación en los materiales terciarios y suelos cohesivos de terraza, dado su contenido en yeso, tendrán características variables desde tolerables a marginales y QS0 a QS1 para su reutilización en la formación de terraplenes.

- Capacidad portante baja de los suelos cohesivos de terraza. Posibilidad de aparición de suelos blandos compresibles, a favor de niveles freáticos altos, en la zona de vaguada asociada al Barranco de Valdefuente.
- Posible existencia de rellenos antrópicos y vertidos en antiguas extracciones de áridos en la zona, especialmente al final de los trazados previstos y previo cruce del río Ebro mediante viaducto.
- Deberán preverse sustituciones o tratamientos del terreno en los rellenos antrópicos previo apoyo de los terraplenes proyectados y descartar cualquier tipo de cimentación de estructuras sobre ellos.
- Los posibles encharcamientos que se pudieran producir en los terrenos más llanos no serán duraderos, a excepción de los niveles cohesivos de terraza más impermeables. Deberá preverse la colocación de cimiento drenante en la base de los terraplenes.

En todos los casos, se trata de configuraciones geológicas de frecuente aparición que requieren del establecimiento de medidas geotécnicas usuales para su tratamiento y que no representan singularidades o dificultades de relevancia a destacar.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los distintos riesgos geológico-geotécnicos para cada unidad diferenciada.

FORMACIÓN GEOLOGICA	LITOLOGÍA	CONDICIONANTES		
		LITOLÓGICOS	MORFOLÓGICOS	HIDROGEOLOGICOS
Formación Lerín	Alternancia de arcillas calcáreas con pasadas limosas y yesos formando niveles bien definidos. Los yesos se disponen en finas capas (milimétricas a centimétricas) o capas más gruesas (a escala decimétrica). Ocasionalmente bancos de areniscas.	<p>Materiales alterables, forman suelos residuales de menor capacidad portante, con índices CBR bajos y con un grado de agresividad bajo y localmente medio-alto (dependiendo del contenido de yesos).</p> <p>Las arcillas, en la zona más superficial más alterada, pueden contener minerales potencialmente expansivos y que provoquen ciertos hinchamientos.</p> <p>En conjunto, los materiales serán excavables y el producto de los desmontes tendrá características variables desde suelos tolerables a marginales.</p>	Zona con relieve suave y alomado, con escasos desniveles y de pendientes suaves, sin problemas geomorfológicos reseñables.	Formación impermeable. Únicamente, a través de los niveles de yesos, en caso que presenten gran continuidad y cierta potencia, podrían generarse disoluciones con el consiguiente reflejo en superficie de formas kársticas.
Depósitos granulares de terrazas y suelos de glaciares	Gravas poligénicas, cuarcíticas, a veces calcáreas, con intercalaciones arenosas y limosas. Localmente pueden aparecer cementadas ("mallacán").	Son terrenos excavables, pero localmente con ripabilidad marginal (conglomerados), con CBR altos y poca plasticidad. Con respecto a la utilización de los materiales podrán ser reutilizables como suelos aptos para terraplén o todo uno. Los más granulares y con menos finos, no plásticos, podrán ser utilizados en las capas más restrictivas. En términos generales, los contenidos en sulfatos y otras sales solubles suelen ser escasos, aunque pueden aumentar en zonas de sustratos evaporíticos cercanos.	Forman superficies llanas, o algo inclinadas, y escalonadas. Como único condicionante geomorfológico hay que señalar la posible presencia local de algunas depresiones endorreicas, impuestas por subsidencias o hundimientos en el sustrato evaporítico. Aunque estas depresiones pueden ser encharcables durante las lluvias, la alta capacidad de infiltración de los materiales granulares de la terraza hace que estos encharcamientos no sean duraderos.	No son previsible problemas hidrogeológicos, ya que los niveles freáticos se encuentran a profundidades suficientes para no ser afectados por los trazados. Los posibles encharcamientos que se pudieran producir en los terrenos más llanos no serán duraderos, dada la alta permeabilidad de los suelos granulares de la terraza.
Depósitos cohesivos de terraza	Arcillas y limos que recubren, parcialmente, los suelos de terraza alta. Aparecen constituidos por arcillas de baja plasticidad, tipo CL.	<p>Materiales muy alterables con problemas de erosionabilidad, índices CBR bajos y con un grado de agresividad bajo a localmente medio-alto en función del contenido en yeso.</p> <p>Pueden contener minerales potencialmente expansivos y que provoquen ciertos hinchamientos.</p> <p>En conjunto, los materiales serán excavables y el producto de los desmontes tendrá características variables desde suelos tolerables a marginales.</p> <p>Capacidad portante baja para el apoyo de rellenos y cimentaciones de estructuras.</p>	Forman superficies llanas, o algo inclinadas, y escalonadas. Como único condicionante geomorfológico hay que señalar la posible presencia local de algunas depresiones endorreicas, impuestas por subsidencias o hundimientos en el sustrato evaporítico. Estas depresiones pueden ser encharcables durante las lluvias, dada la baja permeabilidad de los materiales cohesivos.	No se estiman niveles freáticos en el seno de estos suelos, por lo que no se espera la existencia de suelos blandos y saturados que redunden en tratamientos específicos del terreno para paliar estos efectos.
Rellenos antrópicos incontrolados. Vertidos	Materiales heterogéneos según su procedencia y naturaleza.	<p>Suelos alterables, de muy baja capacidad portante y con cierto grado de agresividad con su variable contenido en yeso.</p> <p>Deberá preverse su retirada a vertedero y el empleo de sustituciones o tratamientos del terreno previo apoyo de los terraplenes, aunque estos sean de baja altura.</p> <p>Se descarta cualquier tipo de cimentación de estructuras sobre ellos.</p>	Presentan diferentes morfologías, en función de la forma de vertido o planes de restauración en el caso de antiguas extracciones de áridos realizadas en la zona.	No se esperan problemas hidrogeológicos. Los posibles encharcamientos que se pudieran producir en los terrenos más llanos no serán duraderos, dada la permeabilidad estimada para estos depósitos antrópicos de muy baja compacidad.

Tabla 7. Tabla de riesgos geotécnicos estimados

5.3 GEOTECNIA DEL MOVIMIENTO DE TIERRAS

Los datos utilizados para la elaboración de este apartado se han obtenido tras el análisis de la bibliografía existente, los diferentes documentos mencionados en el apartado *Fuentes de información*, las plantas y perfiles longitudinales de la Alternativa 0 y Alternativa 1, así como la experiencia de TPF-GETINSA-EUROESTUDIOS.

Desde el punto de vista general no existen inviabilidades o grandes dificultades geotécnicas en los trazados de las diferentes Alternativas proyectadas, por lo que se podrá alcanzar la estabilidad de los desmontes y rellenos previstos con una adecuada inclinación de sus taludes.

Los desmontes que se recomiendan hay que entenderlos como desmontes “medios” y que aseguran que la medición del movimiento de tierras será globalmente correcta. Sin embargo, no hay que tomarlos como los desmontes que realmente deban construirse ya que, por su condición de “medios”, en algunos casos podrán plantearse inclinaciones superiores y, en otros, más tendidas.

Para definir los taludes más convenientes e idóneos, tanto desde el punto de vista técnico como económico, deberá realizarse un estudio detallado en estudios posteriores del que se obtenga, desmonte a desmonte, los datos suficientes para su construcción.

En los tramos estudiados los diferentes trazados discurren por suelos cuaternarios de diferente naturaleza y depósitos terciarios. La inestabilidad podrá originarse únicamente por rotura a través de la masa del suelo, pudiendo suprimirse con taludes suficientemente tendidos que eviten las caídas.

Para el apoyo de los rellenos no se esperan problemas de importancia, salvo los terraplenes de cierta entidad que se apoyen sobre suelos cohesivos de baja capacidad portante y rellenos antrópicos, donde deberán preverse saneos y/o tratamientos del terreno.

5.3.1 Desmontes

Criterios de diseño

Respecto a las inclinaciones más adecuadas, desde un punto de vista estrictamente geotécnico, se considera que el ángulo de inclinación idóneo para un talud de desmonte es el máximo que éste admite para ser estable sin necesidad de sostenimiento. Todas las inclinaciones menores que ésta serán aptas desde un punto de vista geotécnico, pudiendo aplicarse como solución final si por otros condicionantes se considera oportuno.

Si la inclinación adecuada fuese muy tendida, implicando una ocupación de terreno alrededor de la traza excesivamente extensa, podría verticalizarse, lo que conllevaría el diseño de las necesarias medidas de refuerzo o contención.

El diseño de los desmontes se orienta a asegurar su estabilidad global, proyectándose taludes uniformes, sin bermas, y en ningún caso se ha considerado diseñar taludes dobles. No se ha planteado el diseño del desmonte con bermas a alturas fijas por considerar que la construcción de una pendiente uniforme facilita la ejecución y evita zonas de debilidad que suponen las esquinas de las bermas fácilmente erosionables, además de disminuir los rebotes de las cantos, por lo que se evita en muchas ocasiones que lleguen a la calzada.

En la tabla adjunta se muestran los taludes previstos para la Alternativa 0 y Alternativa 1. En la primera se genera un desmonte con un desarrollo del orden de 1250 m, de 9-10 m de altura máxima, a excavar sobre el terciario, suelos de terrazas pleistocenas y depósitos de glaci. En la Alternativa 1 únicamente se genera un pequeño desmonte, inferior al metro entre el PK 0+500-0+600 aproximadamente.

Alternativa	PK.I.	PK.F.	Longitud (m)	Hmáx (m)	PK. Máx.	Terreno	Talud
Alternativa 0	1+700	2+950	1250	9-10 m	2+000	Terciario+Terrazas Pleistocenas+Glacis	3H:2V
Alternativa 1	0+500	0+600	100	< 1 m	0+550	Glacis	3H:2V

Tabla 8. Desmontes generados

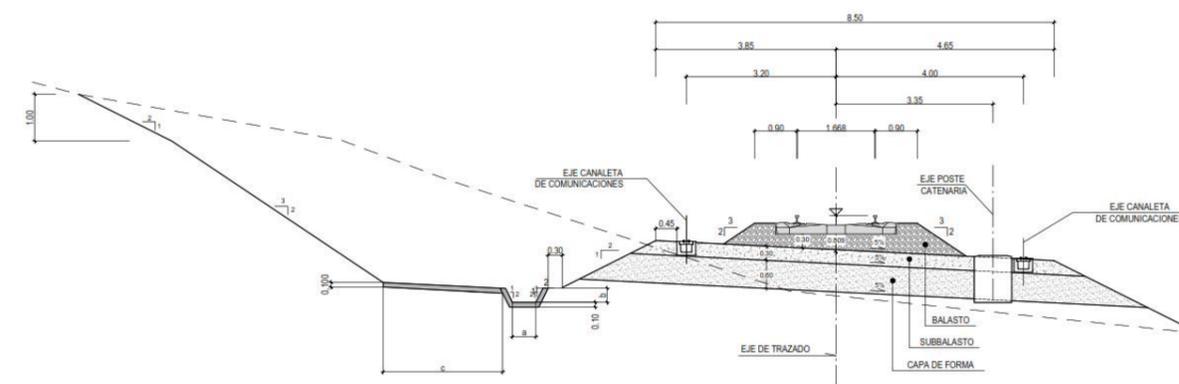


Figura 8. Sección Tipo en desmonte

Excavabilidad

La excavabilidad de los materiales involucrados depende de varios factores, como son el grado de compacidad, cohesión o cementación, medios mecánicos que se disponga, etc.

Se considera que los suelos podrán ser excavables mediante métodos convencionales en su práctica totalidad, a excepción de algunas zonas más cementadas de terraza ("mallacán") que podrán requerir la ayuda de ripado para su extracción. Se estima que la práctica totalidad de los materiales terciarios podrán ser excavables por medios mecánicos convencionales y puntualmente ripables.

Aprovechamiento de materiales

Los taludes se excavarán sobre materiales terciarios, suelos de terraza pleistocena y depósitos tipo glacis. Se estima que los materiales procedentes de los desmontes podrán ser parcialmente reutilizables para la formación de núcleo de rellenos excepto la tierra vegetal, despeje, desbroce y los depósitos terciarios por su posible exceso en el contenido en yeso.

Se considera adecuado un coeficiente de paso $K=1,00$ teniendo en cuenta el proceso de excavación, transporte y puesta en obra, así como la pérdida de material durante las épocas más lluviosas.

El espesor medio de tierra vegetal se estima en unos 40 cm. Esta primera capa vegetal deberá ser retirada y se procederá a su almacenamiento en condiciones adecuadas para evitar su deterioro y su posterior utilización donde se precise.

Alternativa	PK.I.	PK.F.	Longitud (m)	Hmáx (m)	PK. Máx.	Material	Talud	Excavabilidad	Aprovechamiento	Recomendaciones
Alternativa 0	1+700	2+950	1250	9-10 m	2+000	Terciario + Terrazas Pleistocenas + Glacis	3H:2V	80% E - 20% R	70% Núcleo - 30% Vertedero	Colocación de malla de guiado en los suelos de terraza para altura superior a 5 m.
Alternativa 1	0+500	0+600	100	< 1 m	0+550	Glacis	3H:2V	100% E	Vertedero	-

Tabla 9. Cuadro resumen de desmontes

5.3.2 Rellenos

En comparación con la construcción de los desmontes, la de los rellenos tiene una mayor trascendencia a medio y largo plazo, ya que la mayor parte de los problemas que puedan surgir en los desmontes aparecerán durante la fase de construcción y, por lo tanto, habrán sido resueltos antes de entrar la obra en servicio.

Los rellenos constituyen una entidad de obra de la máxima importancia a efectos de seguridad a largo plazo, estando esta seguridad condicionada por la calidad de la construcción sobre todo en lo referente a la preparación del terreno de apoyo y a la construcción del propio relleno, factores estos que en caso de mala ejecución pueden comprometer la estabilidad del mismo.

Elementos de sostenimiento

En el caso de suelos y depósitos terciarios, donde la rotura sólo es posible a través de la masa, no se consideran necesarios elementos de sostenimiento, ya que se diseñan con taludes que garanticen la estabilidad global del desmonte.

No obstante, y dado el carácter esencialmente granular de algunos de los materiales excavados (terrazas), es muy frecuente que en los taludes de los desmontes se produzcan caídas de cantos, originadas por inestabilidades de tipo puntual. Estos fragmentos ruedan y rebotan por la superficie del talud pudiendo alcanzar la calzada. Las inestabilidades puntuales que provocan estas caídas son a priori difíciles de predecir. Al no tratarse de inestabilidades globales del talud, generalmente se opta por aplicar protecciones que permiten que estos desprendimientos ocurran, pero buscando soluciones para su contención o aminoramiento de efectos. En este sentido, el revestimiento de taludes con mallas es un tratamiento económico y eficaz para evitar la proyección de cantos, bolos y bloques sobre la calzada.

A continuación, se muestra un cuadro resumen con los desmontes generados para la Alternativa 0 y Alternativa 1.

Los datos utilizados para la elaboración de este apartado, al igual que en el caso de los desmontes, se han obtenido tras el análisis de la bibliografía existente, los diferentes documentos mencionados en el apartado *Fuentes de información*, las plantas y perfiles longitudinales de la Alternativa 0 y Alternativa 1, así como la experiencia de TPF-GETINSA-EUROESTUDIOS.

En la tabla adjunta se muestran los terraplenes previstos para la Alternativa 0 y Alternativa 1. En la primera se generan alturas del orden de 8 m hacia el cruce con el Barranco de Valdelafuente, unos 10-11 m en el PK 4+300, hasta 13 m sobre los suelos de terraza alta en el PK 4+650 y un máximo de 17 m hacia el final del trazado de la Alternativa 0, previo inicio del Viaducto de Cruce del Río Ebro. Por el contrario, en la Alternativa 1, la magnitud de los

terraplenes es muy inferior, del orden de 2-4 m a lo largo del trazado, a excepción del final del mismo, hacia su entronque con la Alternativa 0 y donde se alcanza un máximo de 11-12 m.

Alternativa	PK.I.	PK.F.	Longitud (m)	Hmáx (m)	PK. Máx.	Terreno	Talud
Alternativa 0	0+000	1+250	1250	3 m	1+200	Terraza Pleistocena	2H:1V
	1+250	1+700	450	8 m	1+500	Suelos de Vaguada Barranco Valdelafuente	2H:1V
	2+950	4+354	1404	10-11 m	4+300	Suelos de Glacis y Terraza Alta	2H:1V
	4+438	4+650	212	13 m	4+650	Terraza Alta	2H:1V
	4+650	4+955	305	17 m	4+700	Rellenos antrópicos	2H:1V
Alternativa 1	0+000	0+500	500	2-3 m	0+400	Terraza Alta	2H:1V
	0+500	2+650	2150	4 m	1+100/2+600	Suelos de Glacis y Terraza Alta	2H:1V
	2+650	2+987	337	11-12 m	2+700	Rellenos antrópicos	2H:1V

Tabla 10. Rellenos generados

Los rellenos presentan, en general, para la Alternativa 1, alturas bajas y se diseñan todos ellos con taludes del tipo 2H:1V que garantizan la estabilidad del propio relleno. En el caso de la Alternativa 0 se alcanzan alturas en distintos puntos que superan los 5 m (PK 1+500, PK 4+300, PK 4+650 y PK 4+700) y tendrán que tener en cuenta, además de inclinaciones 2H:1V, la construcción a partir de materiales de muy buenas características geotécnicas y un adecuado control y puesta en obra.

Se comprueba, por otro lado, que parte de los rellenos apoyarán sobre suelos de fondo de vaguada del Barranco de Valdelafuente, depósitos cohesivos de terraza de media capacidad portante y, muy especialmente, al final de ambas Alternativas, se estima la existencia de vertidos antrópicos que rellenan parcialmente una antigua extracción de áridos.

En estos puntos deberán preverse estudios de detalle para garantizar el apoyo de los terraplenes en condiciones adecuadas en cuanto a estabilidad y deformaciones o asentamientos se refiere, debiendo preverse sustituciones y/o tratamientos del terreno en función de las características resistentes y deformacionales de los materiales existentes y alturas proyectadas.

El resto de suelos cuaternarios, bien debido a su naturaleza granular o por su adecuada capacidad portante al presentarse desecados y ligeramente encostrados o carbonatados, no se considera ningún tipo de actuación salvo la retirada de la tierra vegetal y la recompactación de la superficie resultante mediante varias pasadas de rodillo liso.

Criterios de diseño. Estabilidad

Para garantizar la estabilidad del conjunto relleno-cimiento se han definido una serie de condiciones generales para todos los rellenos que serán:

- El apoyo de los rellenos se realizará sobre sustrato terciario o suelos, siempre que éstos últimos garanticen su estabilidad y que los asentamientos postconstructivos sean admisibles. Como norma general, y previo apoyo de los rellenos, se retirarán todos los vertidos o suelos antrópicos de mala calidad. También deberá ser retirada la tierra vegetal, cuyo espesor medio se estima en unos 40 cm.

En general, los terrenos sobre los que se cimentarán los rellenos proyectados serán, en su mayoría, suelos de buena capacidad portante para las alturas previstas, aunque en la Alternativa 0, con rellenos de mucha mayor entidad que la Alternativa 1, requerirá estudios específicos para la caracterización de los suelos de cimentación. Además, en el Barranco de Valdelafuente y especialmente el final del trazado por la existencia de rellenos antrópicos, deberán tratarse y prepararse adecuadamente debido a las bajas características portantes previstas.

- Una zona donde se acumulará agua con facilidad, si no se trata debidamente, es la unión del faldón superior del terraplén con la ladera. Como consecuencia, puede provocarse incluso la formación de un nivel freático en el cuerpo del relleno, aunque sólo sea temporalmente. El terraplén construido constituye una especie de manto de impermeabilización que impide o al menos dificulta la salida del agua. Además, la carga introducida por el terraplén tiende a disminuir el índice de poros de los suelos, con la correspondiente disminución de la permeabilidad. En rellenos es imprescindible la construcción de cunetas en el pie de aguas-arriba para evitar que entre agua en el contacto relleno-cimiento y, donde se requiera, se colocará material granular drenante.
- Cuando el terraplén atraviese una vaguada o el cauce de algún arroyo, conviene sustituir el material de terraplén por uno permeable tipo escollera o zahorra limpia. Aunque se hayan previsto obras de drenaje, éstas a menudo no siguen el curso actual y el agua fluye a través del relleno siguiendo el antiguo cauce, pudiendo originar un nivel freático en el terraplén.
- En laderas con pendientes transversales superiores a 10º será preciso excavar bermas horizontales para su apoyo. Las banquetas de apoyo se diseñan teniendo en cuenta una anchura de 5 metros (suficiente para el paso de la maquinaria) y un desnivel entre plataformas del orden de 1 metro. Estas bermas habrán de excavar una vez desbrozado el terreno y retirada tanto la tierra vegetal como los posibles suelos de peor calidad. En los casos en que no se requieran bermas, debido a la poca pendiente del terreno, se recomienda excavar el terreno vegetal y recompactar la superficie resultante con varias pasadas de rodillo.

- De igual manera, cuando el nuevo relleno apoye sobre un terraplén antiguo, se deberá realizar entre ambos una sobreexcavación o saneo de forma que se logre un mejor solape entre ambos rellenos.
- Aunque se estima muy improbable, deberá ponerse especial cuidado en captar y drenar adecuadamente, fuera del terraplén, todas las posibles afluencias de agua o zonas de humedad que puedan aparecer en la excavación del cimientado, pues de no hacerse así, con el tiempo el agua puede discurrir por el contacto terreno-relleno, produciendo un reblandecimiento del contacto, e incluso penetrar en el terraplén y originar presiones hidrostáticas dentro del mismo y en el contacto.

A efectos de estabilidad del propio relleno, la pendiente de los taludes viene condicionada por su altura y por las características resistentes del material disponible para su construcción. En este estudio se han adoptado taludes del tipo 2H:1V. Como ya se ha comentado, los materiales procedentes de la excavación de los desmontes darán lugar, básicamente, a rellenos tipo terraplén que podrán emplearse parcialmente en la construcción de rellenos. Deberán reservarse los materiales cohesivos que resulten aptos para la construcción de terraplenes de menor altura y los depósitos granulares, de mayor calidad, para los rellenos de mayor entidad.

Asientos

Los asientos que experimentarán los rellenos se deberán tanto a la consolidación del propio relleno como la del terreno de apoyo.

En nuestro caso, buena parte de los rellenos apoyarán sobre suelos poco compresibles por lo que el asiento del terreno de apoyo será admisible para las alturas previstas. No obstante, existen suelos donde serán necesarios tratamientos del terreno (sustitución y/o mejora de los mismos) previa construcción de los terraplenes. Los rellenos construidos deberán tener asientos admisibles y producirse, en su mayor parte, antes de entrar la obra en servicio.

En cuanto a los asientos que se generarán en el cuerpo de los rellenos dependerá, básicamente, del tipo de material que se emplee en la construcción del mismo y del grado de compactación que se alcance en obra.

Desde el punto de vista ingenieril únicamente tienen significado los asientos residuales después de terminados los rellenos, así como el plazo en que se producirán los asientos. En los rellenos tipo terraplén se estima que los asientos residuales serán del orden del 0,4% de su altura y se producirán en poco tiempo, siempre que la puesta en obra se haya realizado en condiciones de humedad cercanas a la óptima del Proctor. Así, suponiendo un grado de compactación adecuado, los asientos alcanzarán el 50% en los seis meses posteriores a la construcción del relleno y hasta el 75% en el año siguiente.

En cualquier caso, se recomienda que los rellenos se ejecuten lentamente, con tongadas delgadas y esperando el máximo tiempo posible para el extendido del firme, sobre todo en las zonas de menor capacidad portante.

A continuación, se incluye un cuadro resumen de rellenos para las Alternativas propuestas en este estudio.

Alternativa	PK.I.	PK.F.	Longitud (m)	Hmáx (m)	PK. Máx.	Terreno	Talud	Recomendaciones
Alternativa 0	0+000	1+250	1250	3 m	1+200	Terraza Pleistocena	2H:1V	Cimiento drenante
	1+250	1+700	450	8 m	1+500	Suelos de Vaguada Barranco Valdelafuente	2H:1V	Posibles saneos. Cimiento drenante
	2+950	4+354	1404	10-11 m	4+300	Suelos de Glacis y Terraza Alta	2H:1V	Puntuales saneos. Cimiento drenante
	4+438	4+650	212	13 m	4+650	Terraza Alta	2H:1V	Puntuales saneos. Cimiento drenante
	4+650	4+955	305	17 m	4+700	Rellenos antrópicos	2H:1V	Posibles sustituciones/Tratamiento de mejora
Alternativa 1	0+000	0+500	500	2-3 m	0+400	Terraza Alta	2H:1V	Cimiento drenante
	0+500	2+650	2150	4-5 m	1+100/2+600	Suelos de Glacis y Terraza Alta	2H:1V	Cimiento drenante
	2+650	3+000	350	11-12 m	2+700	Rellenos antrópicos	2H:1V	Posibles sustituciones/Tratamiento de mejora

Tabla 11. Cuadro resumen de rellenos

5.4 GEOTECNIA DE CIMENTACIONES DE ESTRUCTURAS

La totalidad de las estructuras se emplazan sobre suelos cuaternarios de diferente naturaleza y composición (suelos de fondo de vaguada, depósitos tipo glacis, terraza alta del río Ebro y terrazas pleistocenas). Para las obras de drenaje, dadas las bajas solicitaciones requeridas, podrán efectuarse cimentaciones directas sobre los materiales sobre las que se ubican. En el caso de los pasos superiores de la Alternativa 0, situadas sobre los depósitos granulares de muy alta densidad relativa que componen las terrazas pleistocenas, podrían ser factibles cimentaciones directas. En el resto de los casos se estiman cimentaciones profundas mediante pilotes apoyados sobre los materiales granulares muy densos infrayacentes o sustrato terciario de elevada cohesión y consistencia.

Hay que tener en cuenta, además, debido al contenido en yeso de algunos suelos y aguas freáticas, la agresividad a los hormigones de cimentación por lo que, a excepción de las terrazas pleistocenas, para el resto de estructuras se estima que requerirá cementos sulforresistentes.

A continuación se presenta un cuadro resumen con la tipología de cimentación de los viaductos generados a lo largo de todas las Alternativas propuestas.

Alternativa	Estructura	PK	Suelos existentes	Cimentación estimada
Alternativa 0	PS-1. Paso Superior Camino	1+000	Terraza Pleistocena	Directa
	Vto. Barranco Valdelafuente (L=30 m)	1+500	Suelos de Vaguada	Profunda mediante pilotes
	PS-2. Paso Superior Camino	2+200	Terraza Pleistocena	Directa
	OD Marco 3x2 m	3+045	Glacis	Directa
Alternativa 1	Vto. FFCC y Caminos (L=82 m)	4+400	Terraza Alta	Profunda mediante pilotes
	OD Marco 3x2 m	1+060	Terraza Alta	Directa
	PS-1. Paso Superior Camino	1+400	Terraza Alta	Profunda mediante pilotes

Tabla 12. Cuadro resumen cimentaciones de estructuras

6 COMPARATIVA ENTRE SOLUCIONES

Las formaciones geológico-geotécnicas diferenciadas en el área de estudio se han valorado a partir de 8 índices geotécnicos. Este análisis constituye un punto de partida para la comparación global considerada en el Anejo nº 13 de Comparación de Alternativas y Análisis Multicriterio.

En cada índice se ha definido hasta cuatro grados, de 1 a 4, con un peso en la valoración final en función de la mayor o menor importancia para cada uno de ellos. Los índices utilizados han sido los siguientes:

- Índice de aprovechamiento de tierras.
- Índice de capacidad portante.
- Índice de excavabilidad.
- Índice de agresividad al hormigón.
- Índice de expansividad.
- Índice de estabilidad desmontes.
- Índice de estabilidad de rellenos.
- Índice de acuíferos.

La valoración para cada uno de ellos es la siguiente:

6.1.1 Índice de aprovechamiento de tierras

1. Aprovechamiento para núcleo de rellenos y otros usos.
2. Aprovechamiento únicamente para núcleo de terraplenes.
3. Aprovechable no previsible.
4. No aprovechable. Vertedero.

6.1.2 Índice de capacidad portante

1. Buena capacidad portante. Suelos duros o densos-densos.
2. Capacidad portante media. Suelos muy firmes.
3. Capacidad portante baja. Suelos moderadamente firmes a firmes.

4. Suelos de malas características geotécnicas y muy deformables.

6.1.3 Índice de excavabilidad

1. Excavable por medios mecánicos normales.
2. Excavable y puntualmente ripable.
3. Ripable con prevoladura.
4. Voladura.

6.1.4 Índice de agresividad al hormigón

1. Sin presencia de yesos.
2. Contenidos bajos de sulfatos o sales disueltas.
3. Niveles medios-altos de sulfatos o sales disueltas.
4. Formaciones eminentemente yesíferas o salinas.

6.1.5 Índice de expansividad

1. Sin problemas de expansividad.
2. Marginal.
3. Crítico.
4. Muy crítico.

6.1.6 Índice de estabilidad de desmontes

1. Taludes estables con pendientes iguales o superiores al 1H:1V para alturas moderadas.
2. Taludes con ciertos problemas de estabilidad. Inclinaciones del tipo 3H:2V.
3. Taludes con problemas de estabilidad. Inclinaciones del tipo 2H:1V.
4. Problemas de estabilidad asociados a movimientos del terreno. Importantes medidas de contención.

6.1.7 Índice de estabilidad de rellenos

1. Rellenos donde no se esperan deformaciones importantes del terreno de apoyo.

2. Apoyo sobre suelos que experimentarán una cierta deformación.
3. Apoyo de rellenos sobre materiales que, por su altura y características de los suelos de cimentación, requerirán ciertos saneos.
4. Necesidad de tratamientos específicos de mejora y tratamiento de los suelos de apoyo.

6.1.8 Índice de acuíferos

1. Impermeable, buen drenaje superficial. No hay acuíferos afectados.
2. Nivel freático profundo. Drenaje aceptable.
3. Posibilidad de niveles acuíferos próximos a la superficie aunque sean locales. Torrentes estacionales.
4. Nivel freático próximo a la superficie. Zonas inundables.

6.1.9 Valoración de las formaciones geológicas

El peso que a cada índice se le ha adjudicado en esta zona de estudio, según su mayor o menor importancia, es el siguiente:

• Índice de aprovechamiento de tierras	0.15
• Índice de capacidad portante	0.15
• Índice de excavabilidad	0.15
• Índice de agresividad al hormigón	0.10
• Índice de expansividad	0.10
• Índice de estabilidad desmontes	0.10
• Índice de estabilidad de rellenos	0.15
• Índice de acuíferos	0.10

A efectos de valoración, las formaciones geológicas diferenciadas y que serán afectadas por las distintas Alternativas, se han agrupado, teniendo en cuenta características y propiedades geotécnicas semejantes, en las siguientes unidades:

1. Terciario
2. Terrazas pleistocenas

3. Depósitos de glacia
4. Suelos de terraza alta
5. Rellenos antrópicos y suelos de vaguada del Barranco de Valdelafuente

La valoración global del riesgo geológico-geotécnico, obtenido para cada formación y atendiendo a su afección con base a los factores anteriormente mencionados, se resume en los cuadros adjuntos para cada Alternativa.

ALTERNATIVA 0										
Unidad Geotécnica	ÍNDICES Y PARÁMETROS CONTINUOS				ÍNDICES Y PARÁMETROS DISCRETOS				Valoración global	Tanto por uno
	Aprov. material	Capacidad portante	Excavabilidad	Agresividad Hormigón	Expansividad Hinchamiento	Estabilidad desmontes	Estabilidad rellenos	Acuíferos		
	Ponderación de cada factor en la valoración global de la formación									
	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,15	0,10		
1	3	1	2	3	2	1	1	1	1,750	0,169
2	1	1	2	2	1	2	1	2	1,450	0,140
3	3	2	1	3	1	2	3	2	2,150	0,208
4	1	3	1	3	2	3	3	3	2,300	0,222
5	1	4	1	3	2	4	4	3	2,700	0,261

Tabla 13. Alternativa 0. Valoración global riesgo geológico-geotécnico

ALTERNATIVA 1										
Unidad Geotécnica	ÍNDICES Y PARÁMETROS CONTINUOS				ÍNDICES Y PARÁMETROS DISCRETOS				Valoración global	Tanto por uno
	Aprov. material	Capacidad portante	Excavabilidad	Agresividad Hormigón	Expansividad Hinchamiento	Estabilidad desmontes	Estabilidad rellenos	Acuíferos		
	Ponderación de cada factor en la valoración global de la formación									
	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10	0,10	0,15	0,10		
3	3	2	1	3	1	1	1	2	1,750	0,125
4	1	3	1	3	2	1	1	3	1,800	0,129
5	1	4	1	3	2	1	4	3	2,400	0,172

Tabla 14. Alternativa 1. Valoración global riesgo geológico-geotécnico

6.1.10 Valoración geológico-geotécnica de las Alternativas

En el apartado anterior se ha obtenido una valoración de cada grupo de unidades geológico-geotécnicas diferenciadas. Para determinar la valoración geológico-geotécnica de cada una de las Alternativas se obtendrá, en primer lugar, la longitud parcial que cada Alternativa afecta a los diferentes grupos de formaciones para, a continuación, obtener una ponderación según la longitud total de cada Alternativa.

En las tablas adjuntas se muestra la valoración del indicador por unidad geotécnica y la valoración global por Alternativa en función de las longitudes parciales de trazado y condicionantes geológico-geotécnicos:

Longitud total (m)	Alternativa 0. Valoración del indicador por unidades geotécnicas					Valoración global
	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	
	0,169	0,140	0,208	0,222	0,261	
	Longitudes parciales por formaciones geotécnicas (m)					
4.955	200	2.000	750	1.300	705	0,190

Tabla 15. Alternativa 0

Longitud total (m)	Alternativa 1. Valoración del indicador por unidades geotécnicas					Valoración global
	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	
	-	-	0,125	0,129	0,172	
	Longitudes parciales por formaciones geotécnicas (m)					
2.987	-	-	550	2.100	337	0,133

Tabla 16. Alternativa 1

De acuerdo al análisis realizado, la Alternativa 1 resulta más favorable. Ello es debido, básicamente, a que las alturas de relleno previstas sobre los suelos de terraza alta son mucho más bajas (2-4 m), lo que redundará en una mayor estabilidad y menores deformaciones o asentamientos totales. En el caso de la Alternativa 0 se proyectan sobre estos suelos alturas de terraplén de hasta 13 m de altura, a lo que hay que añadir el cruce de los suelos de fondo de vaguada del Barranco de Valdelafuente, de baja capacidad portante y alturas de terraplén en este punto de hasta 8 m de altura.

7 ESTUDIO DE MATERIALES

El objeto de este apartado consiste en definir, de forma preliminar, los materiales necesarios y su posible procedencia, tanto de las excavaciones de la traza como de zonas próximas a ella y que puedan servir para cubrir las necesidades que la obra demanda.

7.1.1 Necesidad de materiales

De forma genérica, los materiales que serán requeridos en una obra de este tipo serán los siguientes:

- Material para cimiento drenante
- Material para cimiento saturable
- Material para núcleo y espaldones
- Material para coronación
- Material para sustitución en apoyo de rellenos
- Material para capa de forma
- Materiales para cuñas de transición
- Material para subbalasto
- Material para rellenos de carreteras y terraplenes en pasos superiores
- Material para rellenos de caminos
- Suelo seleccionado
- Zahorra artificial
- Áridos para capa base, intermedia y rodadura
- Áridos para hormigones y obras de fábrica

	GRANULOMETRÍA (%)				PLASTICIDAD	M.O. (%)	SULFATOS (%)	COLAPSO (%)	D. MAX. P.M.(t/m³)	C.B.R.	HINCH. C.B.R (%)	D.L.A. (%)	MICRODEVAL HUMEDO (%)	S.D.T. (%)	COEF. FRIABILIDAD	ESTAB. SO ₄ Mg (%)	ESTAB. SO ₄ Na (%)	ESTAB. AGUA (%)
	Tamaño Máximo (cm)	20 mm UNE	5 mm UNE	0,40 mm UNE	0,080 mm UNE													
Pedraplén	Entre 10-50	< 30			<10							< 50		> 70	< 25	< 30	< 20	< 2
Cimiento drenante (¹)	Entre 10-50				< 5	LL < 50 Si 35<LL<50 entonces IP>0,73(LL-20)	< 1	< 5	< 1	> 1,750	> 5	< 1	< 35	> 70	< 25	< 30	< 20	< 2
Cimiento terraplén (con saturación)					< 15 (²)	LL < 50 Si 35<LL<50 entonces IP>0,73(LL-20)	< 1	< 5	< 1	> 1,750	> 5	< 1						
Cimiento refuerzo	8-40 (<40% espesor de la capa)		20-50	< 30	< 8	LL < 50 Si 35<LL<50 entonces IP>0,73(LL-20)	< 1	< 5	< 1	> 1,750	> 5	< 1						
Cimiento Núcleo y espaldones					Con problemas de erosión en los espaldones < 15	LL < 50 Si 35<LL<50 entonces IP>0,73(LL-20)	< 1	< 5 (³)	< 1	> 1,750	> 5	< 1 (⁴)						
Coronación	< 10				< 40 de la fracción inferior a 60 mm Con saturación < 15	LL < 40	< 1	< 5	< 1	> 1,750	> 5	< 1						
Relleno Falso Túnel (hasta 1,5 m por encima de la clave)	< 10					LL < 50 Si 35<LL<50 entonces IP>0,73(LL-20)	< 1	< 5	< 1	> 1,750	> 5	< 1 (⁴)						
Capa de forma	< 10				< 5 Si los materiales no son plásticos < 15		< 0,2				> 10 si el diámetro máx. < 25 mm	< 0,2	Para machaqueo de roca < 30		≤5			
Cuña de transición	< 10				< 5 Si los materiales no son plásticos < 15		Exento				> 10 si el diámetro máx. < 25 mm	< 0,2	Para machaqueo de roca < 30		≤5			
Subbalasto												< 28	< 22					

- (¹) Se aplicarán las especificaciones indicadas para pedraplenes, hasta una cota de cincuenta centímetros (50 cm) por encima de la altura considerada inundable.
- (²) Se prolongará esta exigencia en el núcleo hasta una altura de dos metros (2 m) por encima de la cota del terreno natural.
- (³) La Dirección de Obra podrá admitir suelos con un contenido de sulfatos de hasta el quince por ciento (15%) siempre que se impida la entrada de agua tanto superficial como profunda mediante una coronación y espaldones impermeables.
- (⁴) Para valores de hinchamiento medio superiores al uno por ciento (1%) e inferiores al dos por ciento (2%), sin que ningún ensayo supere el tres por ciento (3%), la utilización del material podrá ser autorizada por el Director de Obra, siempre que el material se coloque a más de dos metros bajo la cota de coronación del terraplén y que su compactación hasta la densidad exigida se efectúe con un contenido en humedad superior al óptico Próctor.

Tabla 17. Cuadro resumen requisitos Adif

Material	M.O. (%)	Sales Solubles (%)	Tamaño máximo (m.m.)	Designación y abertura en m.m. UNE	Límites de Atterberg	Yeso (%)	CBR	Asiento ensayo colapso	Hinchamiento (%)
Suelo seleccionado	<0,2	<0,2 (incluido yeso)	D _{MAX} <100	#0,4<15% En caso de incumplimiento de esta condición, deberán verificarse las siguientes: #2<80% #0,4<75% #0,080<25%	L.L.<30 I.P.<10		E2:10<CBR<20 E3:>20		
Suelo adecuado	<1	<0,2	D _{MAX} <100	#2<80% #0,080<35%	L.L.<40 Para L.L.>30 debe cumplirse I.P.>4				
Suelo tolerable	<2	<1			L.L.<65 Para L.L.>40 debe cumplirse I.P.>0,73(L.L.-20)	<5	≥	<1%	<3
Suelos marginales	<5				Para L.L.>90 debe cumplirse I.P.<0,73(L.L.-20)				<5

En **coronación** se utilizarán suelos adecuados o seleccionados siempre que su capacidad de soporte sea la requerida para el tipo de explanada previsto y su índice CBR sea como mínimo de 5 (CBR≥5).

Para **núcleo** se utilizarán suelos tolerables, adecuados ó seleccionados, siempre que su índice CBR correspondiente a las condiciones de compactación de puesta en obra, sea igual o superior a 3 (CBR≥3).

En el **cimiento** se utilizarán suelos tolerables, adecuados o seleccionados, y siempre que el índice CBR, correspondiente a las condiciones de compactación de puesta en obra sea CBR≥3.

Los suelos clasificados como tolerables, adecuados y seleccionados podrán utilizarse según lo indicado anteriormente, de forma que su densidad después de la compactación no sea inferior:

- En la zona de coronación, a la máxima obtenida en el ensayo Proctor de Referencia.
- En las zonas de cimiento, núcleo y espaldones al 95% de la máxima obtenida en dicho ensayo.

Tabla 18. Clasificación de materiales según PG-3 en su O.C. 326/00

7.1.2 Materiales procedentes de la traza

En las proximidades de la zona de estudio se localizan numerosas graveras y vaciados de antiguas explotaciones de áridos naturales, asociadas a las terrazas del río Ebro, que dado su gran desarrollo, continuidad y calidad de los materiales se han venido explotando en el pasado y se siguen extrayendo en la actualidad.

Dentro de los depósitos aluviales del Ebro, las fuentes de explotación más frecuentes corresponden a las terrazas pleistocenas y las terrazas altas. La terraza baja no es objeto de una explotación tan intensa debido a la presencia de un nivel superficial de arcillas/limos de inundación de cierta potencia, la posición de un nivel freático cercano a superficie y por criterios medioambientales.

Los **materiales terciarios (Formación Lerín)** afloran únicamente en ambos márgenes del Barranco de Valdelafuente (Alternativa 0) constituidos, en general, por depósitos cohesivos tipo CL y clasificados como Q50 por su elevado contenido en sulfatos. A falta de un estudio de detalle para su posible aprovechamiento, no se consideran aptos para ningún uso dentro de la obra prevista, a excepción de un posible diseño encapsulado protegido mediante espaldones o tipo sándwich y siempre procurando impermeabilizar el material de los agentes atmosféricos con base a los estudios especiales a llevar a cabo para su puesta en obra.

Los **suelos cuaternarios cohesivos** asociados a las terrazas pleistocenas, terraza alta y depósitos de glaciares, se clasifican como suelos tipo Q51 (puntualmente Q50 por su contenido en yeso) aunque se estima podrán ser reutilizables únicamente para núcleo de terraplén.

Los **materiales cuaternarios granulares de terraza** constituyen excelentes depósitos para su aprovechamiento. Se trata, esencialmente, de gravas y arenas de muy buena calidad, tal y como queda patente por la existencia de numerosas explotaciones y extracciones sobre estos materiales, tanto ocasionales como permanentes, en el ámbito del río Ebro. Se clasifican, al menos, como suelos tipo Q51 y Q52 aptos para la formación de rellenos y, previo tratamiento, para cimiento drenante, cimiento saturable, capa de forma, cuñas de transición, suelo seleccionado, zahorra artificial, subbalasto, áridos para capas de firme y hormigones.

7.1.3 Préstamos

Para ambas Alternativas, en especial la Alternativa 0 debido a la magnitud y altura de los rellenos proyectados frente a la Alternativa 1, existe un balance de tierras negativo que será necesario suplir con material adicional a la posible reutilización de los materiales procedentes de la traza.

En previsión de un déficit de material en obra cabría definir zonas potenciales de préstamo. No obstante, dados los escasos volúmenes requeridos, así como las posibles restricciones de carácter medioambiental y la existencia de

numerosas explotaciones sobre los suelos de terraza que aportan materiales de excelente calidad con numerosas reservas y volumen aprovechable, hace desaconsejable esta opción y se recomienda la obtención de los yacimientos, graveras o canteras con autorización localizadas en las inmediaciones de la traza.

7.1.4 Graveras y canteras

Se han recogido un total de 13 graveras (G-1 a G-13) sobre las terrazas granulares del río Ebro, una cantera de dolomías y calizas dolomíticas (C-1) y dos explotaciones en ofitas (C-2 y C-3) con distintivo de calidad ADIF "Tipo 1" para balasto.

Las **graveras** se emplazan, todas ellas, sobre suelos de terraza donde se obtienen depósitos granulares aluviales de muy buena calidad y con amplias reservas. Estos materiales podrán ser empleados para muy diversos usos: núcleo y espaldones de rellenos, material para rellenos de carreteras y terraplenes en pasos superiores, rellenos de caminos, suelo seleccionado, material para sustitución en apoyo de rellenos, cimiento drenante, cimiento saturable, coronación, capa de forma, cuñas de transición, zahorra artificial, áridos para firmes, áridos para hormigones y subbalasto.

Las graveras y explotaciones más interesantes, por su proximidad, corresponden a las ubicadas en los Términos Municipales de Tudela y Alfaro (G-3, G-4, G-5 y G-6) situadas a unos 5-10 km al punto medio de la traza aproximadamente. Existen otras más distantes, a unos 20-30 km, en los Términos Municipales de Fustiñana (G-1), Rincón del Soto (G-7), Azagra (G-13) y Funes (G-12).

La **cantera de dolomías y calizas** (C-1) se sitúa en el T.M. Ventas del Baño, donde se explotan dolomías y calizas dolomíticas del Grupo Tera (Triásico-Jurásico) dispuestas en bancos de potencia métrica. Si bien estos materiales presentan buena calidad para distintos usos dentro de la obra, dada su distancia (del orden de 30-35 km), forma de explotación y estructura del macizo rocoso, se recomienda únicamente su empleo como escolleras de protección.

En la obtención de **balasto**, de acuerdo a las exigencias físicas y mecánicas de este tipo de rocas, deberán proceder de las canteras con Distintivo de Calidad Adif para su suministro. Las más cercanas corresponden a la cantera Ofita Navarra (C-3) en el T.M. Elizaburu (Navarra) y Ofitas San Felices en el T.M. San Felices (La Rioja). Ambas extraen ofitas, con Distintivo de Calidad Adif "Tipo 1" y distan, respectivamente, unos 115 y 140 km aproximadamente al punto medio de la zona de estudio.

A continuación, se incluye un cuadro resumen con las explotaciones recogidas para este estudio y una planta con su ubicación.



Figura 9. Situación de explotaciones inventariadas sobre Google Earth

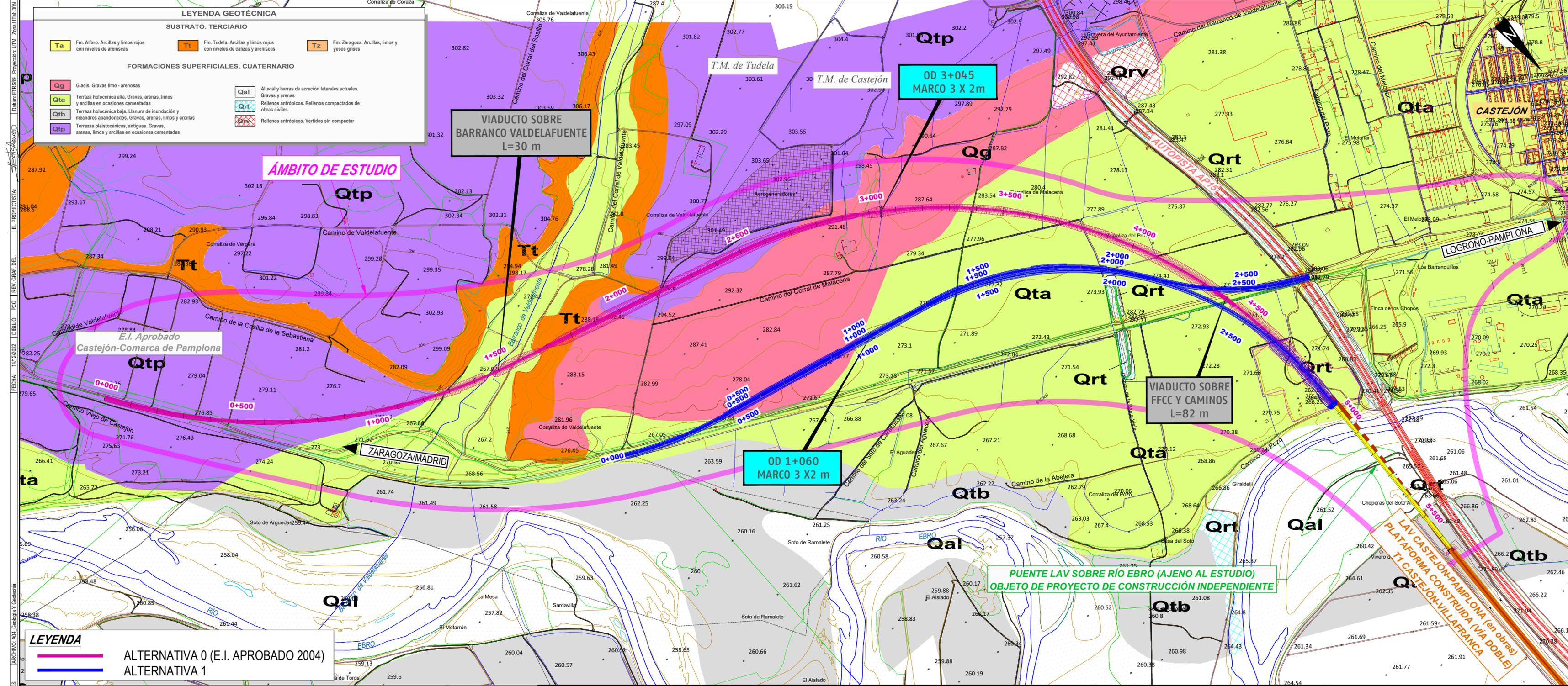
Explotación	Denominación	Término Municipal	Distancia centro traza (km)	Material	Recomendaciones de uso
G-1	Hormigones Fustiñana S.L.	Fustiñana (Navarra)	23	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-2	La Corraliza	Tudela (Navarra)	31	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-3	HORMAVASA	Tudela (Navarra)	10	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-4	Áridos Gamen, S.L.	Tudela (Navarra)	6	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-5	Morteros Alfaro	Alfaro (La Rioja)	7	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-6	Hormigones Mapilo	Alfaro (La Rioja)	9	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-7	José Luis Medrano	Rincón del Soto (La Rioja)	23	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-8	Áridos Santos Arnedo, S.L.	San Adrián (Navarra)	38	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-9	Hormigones Pirámide, S.A.	San Adrián (Navarra)	40	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-10	Áridos y Excavaciones Vicuña. S.L.	Andosilla (Navarra)	46	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-11	Áridos y Hormigones Resano, S.L.	Andosilla (Navarra)	46	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-12	Hormigones Delfín, S.A.	Funes (Navarra)	30	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
G-13	Hormigones Azagra	Azagra (Navarra)	28	Gravas y arenas	CS, N, CR, CF, CT, ZA, AF, AH, SB
C-1	Cantera de Grávalos	Ventas del Baño (La Rioja)	31	Dolomías y calizas	E, P
C-2	Ofitas San Felices	San Felices (La Rioja)	142	Ofitas	B
C-3	Ofita Navarra	Elzaburu (Navarra)	116	Ofitas	B

- E: Escollera
- P: Pedraplén
- N: Núcleo de relleno
- C: Cimiento
- CS: Cimiento saturable
- CR: Coronación
- CF: Capa de forma
- CT: Cuñas de transición
- ZA: Zahorra artificial
- SB: Subbalasto
- B: Balasto
- AH: Áridos para hormigones
- AF: Áridos para firmes

Tabla 19. Cuadro resumen de explotaciones inventariadas

APÉNDICE

PLANO GEOLÓGICO



CÓDIGO: 511020234RES | ARCHIVO: A41_Geología y Geotecnia | FECHA: 14/12/2022 | DIBUJO: PGC | REV. GRAF. DEL: | EL PROYECTISTA: | Datum: ETRS89 | Proyección: UTM, Zona UTM 30N



SECRETARÍA DE ESTADO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA
SECRETARÍA GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS
DIRECCIÓN GENERAL DE PLANIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA RED FERROVIARIA

TÍTULO
Estudio Informativo de la conexión ferroviaria de la línea de Alta Velocidad Castejón-Pamplona en el entorno de Castejón de Ebro

AUTOR DEL ESTUDIO
EPF INGENIERÍA
DELIA ROMERA LUENGO

ESCALA
DIN A1: 1/5.000
DIN A3: 1/10.000
0 50 100 150 200m

FECHA
JUNIO 2023

Nº DE PLANO:
Anejo 4
Hoja 1 de 1

TÍTULO DEL PLANO
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA ALTERNATIVAS ESTUDIADAS