

---

**ANÁLISIS DE MULTICRITERIO**

**ANEJO 20**

---

**ÍNDICE**

---

<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objeto .....	1
<b>2. Alternativas estructurales constructivas .....</b>	<b>1</b>
2.1. Escenarios .....	1
2.2. Estructuras .....	1
2.3. Hidrogeología .....	3
2.4. Costes de ejecución .....	4
2.5. Plazos de ejecución .....	4
2.6. Impacto ambiental .....	4
<b>3. Análisis multicriterio .....</b>	<b>6</b>
3.1. Metodología del análisis .....	6
3.2. Valoración de criterios .....	6
3.2.1. Afección hidrogeológica .....	7
3.2.2. Afección medioambiental .....	9
3.2.3. Coste de inversión .....	9
3.2.4. Plazo de ejecución .....	9
3.3. Análisis multicriterio .....	10
3.3.1. Modelo numérico .....	10
3.3.2. Metodología .....	10
3.3.3. Resultado del análisis .....	11

## 1. Introducción

### 1.1. Objeto

En este análisis de alternativas se pretende analizar y comparar las distintas alternativas que existen para conseguir el objetivo a alcanzar.

La Alternativa 0 (estado actual o de no actuación) no se contempla como posibilidad, ya que no cumple con el objetivo del estudio, que no es otro que desarrollar la integración ferroviaria en el entorno de la estación.

Para el presente análisis se proponen alternativas desde el punto de vista constructivo de las estructuras del soterramiento:

- Soterramiento por recintos estancos con tapón de fondo e infiltraciones impermeabilizantes: **Alternativa 1 – Jet -Grouting**
- Soterramiento por recintos estancos con bombeos de achique y restitución de flujo: **Alternativa 2 - Bombeo**

Las cuales, una vez analizadas y desarrolladas en el resto de los anejos del presente “Estudio informativo del Soterramiento del Ferrocarril en Torrelavega”, se enfrentan en un análisis comparativo, con el fin de seleccionar aquella que presenta un mayor nivel de cumplimiento de los objetivos de la actuación.

## 2. Alternativas estructurales constructivas

### 2.1. Escenarios

Los escenarios que se proceden a comparar son:

- Soterramiento por recintos estancos con tapón de fondo e infiltraciones impermeabilizantes: **Alternativa 1 – Jet -Grouting**
  - › Consiste en ejecutar un tapón de fondo que mejore el comportamiento de la estructura frente al nivel freático. El tapón de fondo o las losas de impermeabilización se realizan mediante el solape de las columnas a una profundidad de 2,50 m y diámetro de 2 metros para evitar el levantamiento hidráulico, ejecutado como Super-Jet.
- Soterramiento por recintos estancos con bombeos de achique y restitución de flujo: **Alternativa 2 - Bombeo**
  - › Consiste en un soterramiento mediante pantallas en el que el nivel freático provoca sub-presiones elevadas en losa de fondo. La bajada del nivel freático se realizará mediante un sistema de bombeo para facilitar la excavación.

### 2.2. Estructuras

La ejecución de toda la obra civil con los condicionantes descritos resulta compleja, ya no sólo por las propias estructuras, si no por el enclave en el que se localiza (zona urbana).

Se comprobarán, desde un punto de vista técnico, la viabilidad de las soluciones estructurales propuestas, para lo cual se analizará el comportamiento de las pantallas con la litología en la que se ejecutan y sometida a los esfuerzos durante la fase de obra y vida útil.

La evaluación se realiza según marca la normativa en vigor:

- Estado Límite Último (ELU), en la que se verificará que las dimensiones y materiales propuestos resultan adecuados y en consecuencia no rompe la pantalla con los esfuerzos obtenidos (aplicando mayoraciones normativas).
- Estado Límite de Servicio (ELS): las deformaciones previsibles entran dentro de los valores admisibles, es decir, no dan lugar a la pérdida de utilidad de la infraestructura ni afectan a estructuras colindantes.

Tanto las hipótesis de cálculo como la resolución de los mismos se incluyen en el Anejo Nº 8 “Estructuras”.

Como resumen del mismo se puede extraer:

La obra civil necesaria para realizar el soterramiento del ferrocarril a su paso por Torrelavega se realizará mediante pantallas continuas de hormigón armado diferenciando dos tipologías por comportamiento:

- Pantallas en voladizo.
- Pantallas con losa superior (arriostradas).

Se ha realizado una comparación de alternativas considerando una segunda alternativa donde se ejecuta un tapón de Jet-Grouting de 2.50 m de profundidad. Este efecto mejora el comportamiento de la pantalla ya que permite elevar el límite de pasivo movilizado.

**Resumen de resultados del cálculo de las pantallas. Alternativa 1**

Pantallas en túnel									
Pantalla	Perfil Geotécnico	SC trasdós (t/m <sup>2</sup> )	L pantalla (m)	Excavación máx (m)	Canto pantalla (m)	□ horizontal máximo (mm)	Cota (m)	M <sub>i</sub> max.servicio (tm/m)	% Pasivo Movilizado
Sección S1	PK 0+870	Ferroviaria IAPF-07	13.00	9.10	0.80	4.1	7.00	34.0	96.7%
Sección S2	PK 1+080	Ferroviaria IAPF-07	13.00	9.10	0.80	3.4	5.90	35.6	62.0%
Sección S3	PK 1+330	Ferroviaria IAPF-07	13.00	9.10	0.80	3.5	6.00	37.1	66.00%

Pantallas en voladizo - Rampas de entrada y salida									
Pantalla	Perfil Geotécnico	SC trasdós (t/m <sup>2</sup> )	L pantalla (m)	Excavación máx (m)	Canto pantalla (m)	□ horizontal máximo (mm)	Cota (m)	M <sub>i</sub> max.servicio (tm/m)	% Pasivo Movilizado
Sección S4	PK 0+870	Ferroviaria IAPF-07	13.00	8.30	1.00	12.5	0.00	69.4	50.2%
Sección S5	PK 1+080	Ferroviaria IAPF-07	13.00	8.30	1.00	11.8	0.00	69.5	41.2%
Sección S6	PK 1+330	Ferroviaria IAPF-07	13.00	8.30	1.00	11.8	0.00	69.5	41.2%
Sección S7	PK 0+870	Ferroviaria IAPF-07	9.50	6.00	1.00	10.3	0.00	28.3	54.7%
Sección S8	PK 1+080	Ferroviaria IAPF-07	9.50	6.00	1.00	9.7	0.00	28.3	41.4%
Sección S9	PK 1+330	Ferroviaria IAPF-07	9.50	6.00	1.00	9.7	0.00	28.3	41.4%

**Resumen de resultados del cálculo de las pantallas. Alternativa 2**

Pantallas en túnel									
Pantalla	Perfil Geotécnico	SC trasdós (t/m <sup>2</sup> )	L pantalla (m)	Excavación máx (m)	Canto pantalla (m)	□ horizontal máximo (mm)	Cota (m)	M <sub>i</sub> max.servicio (tm/m)	% Pasivo Movilizado
Sección S10	PK 0+870	Ferroviaria – IAPF-07	18.00	9.10	0.80	3.9	6.50	33.7	44.3%
Sección S11	PK 1+080	Ferroviaria – IAPF-07	18.00	9.10	0.80	3.2	6.00	33.5	46.4%
Sección S12	PK 1+330	Ferroviaria – IAPF-07	18.00	9.10	0.80	3.3	6.00	34.9	47.1%

Pantallas en voladizo - Rampas de entrada y salida									
Pantalla	Perfil Geotécnico	SC trasdós (t/m <sup>2</sup> )	L pantalla (m)	Excavación máx (m)	Canto pantalla (m)	□ horizontal máximo (mm)	Cota (m)	M <sub>i</sub> max.servicio (tm/m)	% Pasivo Movilizado
Sección S13	PK 0+870	Ferroviaria – IAPF-07	15.00	8.30	1.00	11.8	0.00	69.5	38.3%
Sección S14	PK 1+080	Ferroviaria – IAPF-07	15.00	8.30	1.00	11.2	0.00	69.5	37.9%
Sección S15	PK 1+330	Ferroviaria – IAPF-07	15.00	8.30	1.00	11.2	0.00	69.5	37.9%
Sección S16	PK 0+870	Ferroviaria – IAPF-07	11.00	6.00	1.00	6.9	0.00	28.3	40.1%
Sección S17	PK 1+080	Ferroviaria – IAPF-07	11.00	6.00	1.00	6.7	0.00	28.3	35.1%
Sección S18	PK 1+330	Ferroviaria – IAPF-07	11.00	6.00	1.00	6.5	0.00	28.3	36.7%

De estos resultados se asume que las dos alternativas estudiadas difieren entre sí principalmente en términos estructurales y constructivos. Estos se traducen en diferencias ostensibles en parámetros como hidrogeología, impacto ambiental, costes y plazos de ejecución, que serán los valores de entrada estudiados en el análisis multicriterio.

### 2.3. Hidrogeología

Con respecto a la afección de los flujos hidrogeológicos, ésta siempre se ha definido por dos parámetros: la **permeabilidad de los materiales** y la **afección al nivel piezométrico** tanto en la fase constructiva y como en la situación final.

En cuanto al primer parámetro, en el *Anejo de Geología* correspondiente al *PROYECTO BÁSICO DE SOTERRAMIENTO DEL F.C. FEVE EN TORRELAVEGA* de 2011, se puede comprobar que los depósitos de terraza aluvial donde se va a llevar a cabo la estructura, integrados por gravas, arenas, limos y arcillas, presentan permeabilidades muy elevadas (entre  $3,5E-04$  m/s y  $3E-03$  m/s). En el caso concreto que nos ocupa, la excavación de los materiales geológicos se va a efectuar en fase de obra (con la ejecución del soterramiento) y va a **permanecer invariante** durante la explotación de la estructura, por lo que la permeabilidad de las formaciones **no puede constituir un criterio diferenciador** para el estudio de las alternativas de ejecución.

Por el contrario, la **afección al nivel de agua** sí permite una evaluación de las dos posibles soluciones propuestas para el desarrollo de la fase de obra. Cabe distinguir aquí dos efectos superpuestos que la estructura y su ejecución son susceptibles de provocar sobre el medio acuífero. Por un lado, está el “efecto barrera” al flujo subterráneo que ocasionarán la sucesión de pantallas longitudinales a la estructura. Dicho efecto, modelizado dentro del citado *Anejo de Geología* del documento del proyecto básico, contempla ascensos piezométricos en el lado aguas arriba de la estructura y descensos piezométricos en el lado aguas abajo de la misma. Esta circunstancia, a priori, comenzará a producirse ya en el momento en que se proceda al hormigonado de las pantallas, y se mantendrá hasta el momento en que entren en funcionamiento las medidas de restitución de flujo (portillos, sifones, zanjas drenantes, etc.). No cabe esperar una recuperación de la situación piezométrica original, aunque sí una restitución más o menos próxima a ella. En la práctica, este efecto resulta independiente de la fase de obra o la de explotación, pues depende exclusivamente de la existencia (o no) de pantallas, y éstas se ejecutarán independientemente de la alternativa de obra.

Por otro lado, es preciso considerar un “efecto drenante” que sí será característico de la fase de obra y podría ser más o menos intenso dependiendo de la solución de ejecución que se adopte para el desarrollo de las mismas. Es este efecto sobre los niveles piezométricos el que constituye el verdadero criterio o indicador hidrogeológico para la evaluación de las dos alternativas de ejecución aquí estudiadas.

En la solución denominada “Recintos estancos con bombeo”, en adelante Alternativa 2 – Bombeo, se asume al menos un pozo de bombeo por recinto, con profundidad tal que permita el rebaje del nivel de agua por debajo de la cota de la excavación en las zonas más alejadas de la celda, a fin de permitir la ejecución de los trabajos en ausencia de agua. Ello implica un cono de bombeo más profundo en su ápice (el propio pozo) que la mencionada cota de excavación y, por consiguiente, un descenso de los niveles durante la fase de obra mayor que la solución de la alternativa 1 -Jet. Sin embargo, esta situación de mayor afección resulta transitorio en el tiempo y se limitará a la citada fase de obra. Una vez concluida la estructura, y cesados los bombeos, se estima que la recuperación de los niveles se producirá de forma más o menos rápida, gracias a la elevada permeabilidad de los materiales geológicos afectados. No obstante, dicha recuperación será relativa, puesto que se refiere sólo al efecto de los bombeos de obra. La situación original no llegará a restaurarse del todo, puesto que el “efecto barrera” de las pantallas (dependiendo de las medidas de restitución de flujo), una vez alcanzado el régimen permanente, se hará más o menos patente de forma indefinida.

Por lo que se refiere a la solución “tapón de fondo”, es evidente que el impacto hidrogeológico en fase de obra resulta más reducido, puesto que no implica un rebaje de los niveles de agua tan acusado como la situación anterior. Sin embargo, presenta otros inconvenientes a nivel hidrogeológico. El más relevante lo constituye el control de la inyección de jet-grouting. Resulta necesario llevarla a cabo con sumo cuidado y, sobre todo, con control de la profundidad de sellado. Una inyección descontrolada podría impermeabilizar el terreno más allá de la cota de empotramiento de las pantallas, acentuando el “efecto barrera” permanentemente. Esta situación no sería reversible.

La parametrización de este criterio se reduce al **control y seguimiento de los niveles de agua subterránea** en varios puntos más o menos próximos a las obras (incluyendo posibles pozos de agotamiento que resulta necesario perforar), así como al **control y seguimiento de los caudales de agua que se desalojen** de las obras. Se deberá llevar un exhaustivo seguimiento de los niveles piezométricos: tanto su descenso tras el desagüe-agotamiento como la recuperación del acuífero tras el cese de bombeo. Otros indicadores comúnmente utilizados, como son calidad de aguas, bombeos (método, velocidad, intermitencia,), flotabilidad, erosión de suelos, etc. no serían de aplicación en este caso, al no existir diferencia en ellos entre las alternativas a comparar, por ser estas muy parecidas en su diseño. En cuanto al control de los caudales, se recomienda la instalación de un canal tipo Parshall, de sección conocida, a la salida del colector final de desagüe. Asimismo, se recomienda la instrumentación tanto de los puntos de control piezométrico como del propio canal de desagüe. Los registros automáticos así obtenidos se contrastarían con medidas manuales independientes.

## 2.4. Costes de ejecución

En referente a los costes se analiza la repercusión económica de ambas alternativas tomando los costes específicos del capítulo de estructuras, dado que el resto de los capítulos incluidos en el total del presupuesto son comunes a ambas alternativas.

## 2.5. Plazos de ejecución

Como último criterio se analiza el plazo de ejecución. La principal diferencia entre las dos opciones se encuentra en la ejecución del Jet-grouting. En la Alternativa 1 es necesario incorporar una actividad de obra más (el tratamiento previo del terreno) por delante de la ejecución de las pantallas. Con la densidad de columnas de grava, la profundidad de las pantallas y los espesores del tapón considerados se necesitan alrededor de 11 meses para desarrollar esta actividad, contando con 4 equipos de trabajo (2 en cada lado o frente de trabajo) y dos turnos de 8 horas por equipo. El solape entre actividades debe de ser tal que los equipos de ejecución de pantallas no “alcancen” a los de jet, por lo que es necesario desfazar el inicio de uno con respecto al del otro en **unos 4 meses** en el plazo total de obra. Resultando la ejecución de pantallas mediante bombeos (alternativa 2) una duración de 7 meses.

## 2.6. Impacto ambiental

Tras definir los principales puntos de ejecución de obra se desarrolla el estudio de impacto asociado a los principales agentes ambientales para cada una de las alternativas, contraponiéndolas y encontrando diferencias entre ellas. De este estudio, desarrollado en el DOCUMENTO Nº 4 “ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL”, se identifican los factores de impacto con sus valoraciones.

En la siguiente tabla “Valoración de impactos después de medidas. Impactos residuales” se encuentra cada factor según la alternativa. De esta se desprende que los aspectos ambientales a considerar en este estudio, derivados de la construcción del soterramiento, serán la afección al medio geológico y la afección a la hidrología subterránea.

IMPACTO	SOTERRAMIENTO		VARIANTE EXTERIOR		
	FASE OBRA	FASE EXPLOTACIÓN	FASE OBRA	FASE EXPLOTACIÓN	DESMANTELAMIENTO
Ocupación del suelo	COMPATIBLE	POSITIVO/ BENEFICIOSO	COMPATIBLE	COMPATIBLE	POSITIVO/ BENEFICIOSO
<b>Atmósfera</b>					
Emisión de partículas	COMPATIBLE	-	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE
Emisión GEI	-	POSITIVO	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE
Huella de Carbono	COMPATIBLE	POSITIVO	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE
Adaptación al cambio climático	-	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE
Ruido	COMPATIBLE	POSITIVO/BENEFICIOSO	COMPATIBLE	NULO	COMPATIBLE
Vibraciones	COMPATIBLE	NULO	COMPATIBLE	NULO	COMPATIBLE
<b>Medio geológico</b>					
Geología	Alternativa 1	COMPATIBLE	-	COMPATIBLE	-
	Alternativa 2	COMPATIBLE (+ DESFAVORABLE)	-	COMPATIBLE	-
Geomorfología	COMPATIBLE	-	COMPATIBLE	-	NULO
Edafología	COMPATIBLE	-	COMPATIBLE	-	POSITIVO
<b>Hidrología superficial</b>					
Calidad aguas superficiales	-	-	-	-	-
<b>Hidrología subterránea</b>					
Efectos sobre acuífero	Alternativa 1	MODERADO	COMPATIBLE	-	-
	Alternativa 2	SEVERO	COMPATIBLE	-	-
Calidad aguas subterráneas	Alternativa 1	SEVERO	MODERADO	-	-
	Alternativa 2	MODERADO	MODERADO	-	-
<b>Medio biológico</b>					
Vegetación	COMPATIBLE/POSITIVO	-	MODERADO/POSITIVO	-	POSITIVO
Fauna	-	-	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE
Espacios protegidos	-	-	-	-	-
<b>Medio Social y perceptual</b>					
Paisaje	MODERADO	POSITIVO/ FAVORABLE	MODERADO	COMPATIBLE	COMPATIBLE/POSITIVO
Patrimonio cultural	NULO	-	-	-	-
<b>Social/Territorial</b>					
Organización territorial	MODERADO	POSITIVO/BENEFICIOSO	MODERADO	COMPATIBLE	COMPATIBLE
Planeamiento	NULO	POSITIVO/BENEFICIOSO	COMPATIBLE	-	POSITIVO
Población	COMPATIBLE	POSITIVO/BENEFICIOSO	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE/POSITIVO
<b>Actividades económicas</b>					
Sectores industrial	POSITIVO/ BENEFICIOSO	-	POSITIVO	-	POSITIVO
Sector servicios	POSITIVO	POSITIVO/BENEFICIOSO	POSITIVO	-	POSITIVO
Consumo de recursos	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE
Generación de residuos	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE	COMPATIBLE

Valoración de impactos después de medidas. Impactos residuales

### 3. Análisis multicriterio

#### 3.1. Metodología del análisis

La metodología se basa en la valoración de una serie de criterios básicos, que resumen la caracterización de las distintas alternativas, mediante un parámetro, que caracteriza cuantitativamente cada criterio para cada alternativa.

Una vez realizada dicha valoración, se aplica un modelo numérico que contiene tres análisis independientes entre sí, dando cada uno de ellos un resultado sobre cuál es la alternativa óptima.

El primero de ellos es el análisis de robustez, que es el más objetivo de los tres, y pone de relieve que alternativa tiene mejor comportamiento general con los criterios marcados.

El segundo análisis es el de robustez truncado, es similar al anterior pero limitando determinadas combinaciones de valores posibles de cada criterio en estudio. Pone de relieve la mejor alternativa en función de las limitaciones que se marquen.

Por último, el análisis de preferencias, método PATTERN tradicional, en el que se aplican pesos a los criterios de comparación marcados para el análisis.

Como se ha comentado anteriormente, el análisis de robustez combina todas las posibilidades de peso, mientras que el truncado se limita a que cada criterio asuma un peso comprendido en un determinado intervalo, aquel que tiene más sentido lógico, por lo tanto, es el truncado el que tiene mayor relevancia.

Por lo que en el caso en el que el análisis de robustez truncado coincida como resultado con el análisis de preferencias, o que por lo menos el análisis de preferencia no arroje un resultado claramente contradictorio, se considera que la alternativa elegida ha sido determinada con suficiente objetividad.

#### 3.2. Valoración de criterios

En el presente análisis se han considerado los siguientes criterios:

- Afeción hidrogeológica
  - › Afeción al nivel piezométrico en fase constructiva
  - › Afeción al nivel piezométrico en situación definitiva
  - › Radio de influencia del agotamiento en fase constructiva
- Afeción medioambiental
  - › Medio geológico
  - › Calidad de las aguas subterráneas
- Costes de ejecución
- Plazos de ejecución

Estos criterios han sido escogidos por su representatividad, su importancia y la factibilidad de su valoración por métodos cuantitativos.

Para valorar la idoneidad de cada alternativa con respecto a cada uno de estos criterios, se ha deducido un parámetro único, cuyo valor oscila en todos los casos entre 0 y 10, siendo 10 la mejor valoración.

En la obtención de dichos parámetros es necesario marcar uno o varios indicadores para cada criterio.

En afeción hidrogeológica se plantea como indicador la variación del nivel piezométrico en la fase constructiva y situación final, así como el rango de influencia del acuífero afectado.

En cuanto al criterio de afeción al medioambiente se ha considerado dos indicadores, la afeción al medio geológico y a las aguas subterráneas.

En el caso del coste de inversión se ha considerado un único indicador, el volumen de inversión estimado.

Finalmente, para los plazos de ejecución se ha tomado como indicador la duración total de los trabajos en cada alternativa.



Por lo tanto, la cuantificación del mencionado parámetro, que caracteriza cada escenario para cada criterio de comparación, se realiza mediante los indicadores relacionados; para este proceso se realizan dos niveles:

- **Nivel 2:** en él se produce la caracterización de los indicadores a través de su valor deducido o medido; cuando se tengan varios indicadores para un mismo parámetro, se obtendrá un único índice, que sintetiza las aportaciones de los indicadores que componen cada parámetro, mediante asignación de pesos basados en factores objetivos para graduar el nivel de influencia de cada uno de estos indicadores.
- **Nivel 1:** se obtiene el parámetro que caracteriza cada criterio en comparación mediante la homogeneización de los valores obtenidos para cada indicador en el nivel 2; de forma que se sitúen todos ellos en la misma escala [0,10]. Para ello se realiza un escalado proporcional, de acuerdo con uno de los dos métodos siguientes:
  - En los criterios valorados directamente con un solo indicador numérico no sintético (por ejemplo, la inversión), o en aquellos cuyo valor indicador no dé diferencias apreciables entre alternativas, se asigna al parámetro con indicador óptimo valor 10, y el valor de los demás parámetros se obtiene restando a 10 una cantidad proporcional (con o sin factor amplificador/reductor) a la diferencia porcentual que tiene cada indicador con el óptimo.
  - En los criterios valorados con un indicador que no se corresponde de forma directa con una magnitud medible, puede alternativamente utilizarse el método anterior (adecuado si las alternativas presentan valores de indicador muy homogéneos), o un escalado que asigne valor 10 al parámetro de la alternativa óptima, 0 al de la pésima, y valores intermedios proporcionales al valor del indicador en el resto de las alternativas.

### 3.2.1. *Afección hidrogeológica*

Para este criterio se han considerado tres indicadores:

- El caudal susceptible de producirse a los pocos días de la excavación.
- El caudal de base susceptible de producirse una vez alcanzado el régimen permanente.
- El radio de influencia del descenso ocasionado por el bombeo.

Se han separado y analizado ambas alternativas según su afección en fase de obra y fase de explotación. Además, se han referenciado los valores según el acuífero original sin tratar.

En la fase de explotación se han otorgado valores directos en nivel 1 similares dado que el comportamiento de ambas alternativas tras la restitución de flujos es semejante.

En fase de obra se ha dado un peso mayor al que puede ocasionar mayores afecciones, en este caso, a los sótanos colindantes. Los otros dos factores, son representativos únicamente a efectos favorecer más o menos la ejecución de obra y, en todo caso, para determinar los caudales de vertido de cara al estudio medioambiental.

Se han simulado varios escenarios de los que se recogen los tres más representativos, siendo estos:

- Bombeo en 1 celda sin tratamientos del terreno (permeabilidad original  $5,4E-03$  m/s), valores de referencia, situación más pésima independientemente de la alternativa en estudio.
- Alternativa bombeo con relación  $K_v/K_h$  del 20%.
- Alternativa jet con reducción de permeabilidad general en 2 orden de magnitud por tapón de fondo (permeabilidad  $5,4E-05$  m/s).

Estas simulaciones se han recogido en la siguiente tabla:

BOMBEO (SIN TAPÓN DE FONDO)			REDUCCIÓN PEREMEAB. 1 orden de magnitud Alternativa 2 - Bombes			REDUCCIÓN PEREMEAB. 2 órdenes de magnitud Alternativa 1 - Jet		
Qv (L/s)	Qp (L/s)	R (m)	Qv (L/s)	Qp (L/s)	R (m)	Qv (L/s)	Qp (L/s)	R (m)
250	162	260	128	102	100	23	22	Despreciable

Seguidamente se realiza la puntuación de cada alternativa, determinada por una ponderación de un 20 % en los caudales de infiltración relativos al caudal con permeabilidad original, con el cálculo del nivel 1 en escalado inverso, con una mayor puntuación el que sufra menor infiltración; de un 40 % en los caudales de infiltración relativos al caudal con permeabilidad permanente; y en un 40 % de ponderación en el radio de influencia del agotamiento, también con un nivel 1 en escalado inverso, siendo este peor cuanto mayor el radio.

Finalmente se obtiene la puntuación total otorgando un mayor peso al comportamiento hidrogeológico en fase de obra por ser tan determinante y dispar.

Alternativa	AFECCIÓN HIDROGEOLÓGICA								
	Fase de obra						Fase de explotación	Afección total	
	Caudal inmediato - Qv (L/s)	Nivel 1 [0-10]	Caudal en R. Permanente - Qp (L/s)	Nivel 1 [0-10]	Radio de agotamiento (m)	Nivel 1 [0-10]	Nivel 1 [0-10] Fase de obra	Nivel 1 [0-10] Fase de explotación	Nivel 1 [0-10]
Valores de referencia	250	-	162	-	260	-	-	-	-
Al.2-Bombeo	128	4,88	102	3,70	100	6,15	4,49	8,00	5,54
Al.1-Jet	23	9,08	22	8,64	5	9,20	9,22	9,00	9,16

Pesos:

20%

40%

40%    80%    20%

### 3.2.2. Afección medioambiental

Cada método constructivo tiene propia afección al medio. En este punto se han tomado como variables, por un lado, el impacto sobre la geología que se deriva principalmente de los movimientos de tierras que se requieren para la ejecución del soterramiento y reposición de servicios afectados, definidas por las excavaciones y perforaciones y, por otro lado, la afección al medio hidrogeológico subterráneo midiendo espacialmente alteración de la calidad de las aguas, tanto durante el desarrollo de las obras, como posteriormente durante la explotación de la línea.

Las mediciones en nivel 2 se han tomado según la escala:

NIVEL DE IMPACTO	VALOR
NULO	0
COMPATIBLE	10 a 20
MODERADO	30 a 60
SEVERO	70 a 90
CRÍTICO	100

En el nivel 1 se ha efectuado el escalado inverso, ya que la alternativa es tanto más desfavorable cuanto mayor valor de impacto tengan sea el impacto.

Alternativa	AFECCIÓN MEDIOAMBIENTAL						Afección medioambiental Nivel 1 [0-10]
	Calidad de las aguas				Medio geología		
	Fase de obra	Fase explotación	Nivel 2	Nivel 1 [0-10]	Nivel 2	Nivel 1 [0-10]	
Al.2-Bombeo	45	45	45,00	10,00	20	7,50	<b>8,88</b>
Al.1-Jet	80	45	66,00	6,82	15	10,00	<b>8,25</b>

Pesos: 

60%	40%
-----	-----

55%	45%
-----	-----

### 3.2.3. Coste de inversión.

Se ha considerado como indicador fundamental, y único, el volumen de inversión, medido a través de la estimación realizada de su Precio de Ejecución Material de las estructuras, unidad más diferenciante de ambas alternativas. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

Alternativa	COSTE DE INVERSIÓN	
	Nivel 2	Nivel 1 [0-10]
Al.2-Bombeo	19.871.603,98 €	<b>9,54</b>
Al.1-Jet	18.958.162,94 €	<b>10,00</b>

En el nivel 1 se ha efectuado el escalado inverso, dado que la alternativa es tanto más desfavorable cuanto más volumen de inversión requiera.

### 3.2.4. Plazo de ejecución

Desde este criterio se ha considerado la duración de la ejecución de los trabajos del soterramiento.

En el nivel 1 se ha efectuado el escalado inverso, ya que la alternativa es tanto más desfavorable cuanto más se dilate en el tiempo.

Alternativa	PLAZO DE EJECUCIÓN	
	Duración de afección (meses) Nivel 2	Nivel 1 [0-10]
Al.2-Bombeo	7 meses	10,00
Al.1-Jet	11 meses	6,36

### 3.3. Análisis multicriterio

#### 3.3.1. Modelo numérico

Los parámetros anteriores, que definen la valoración parcial de las alternativas con respecto a los tres criterios considerados, suponen el primer paso para la obtención de un modelo numérico que pueda emplearse como herramienta básica del análisis multicriterio.

El modelo a implementar está basado en la matriz numérica que se emplea en el método PATTERN<sup>1</sup>, que permite sintetizar las valoraciones obtenidas por las alternativas para cada criterio en un sólo parámetro llamado IP (Índice de Pertinencia), cuyos valores están comprendidos en el intervalo [0,10]<sup>2</sup>, correspondiendo el 10 a la óptima y el 0 a la pésima, mediante la aplicación de pesos o coeficientes de ponderación, creando un modelo que permite la comparación directa. De esta forma, se obtiene una matriz Alternativas – Criterios con la que se obtiene el IP para cada alternativa de la siguiente forma:

$$IP_i = \frac{MAX - \sum_j \beta_j \cdot a_{ij}}{MAX - MIN}$$

dónde:

$a_{ij}$  es la calificación obtenida por la alternativa  $i$  para el criterio  $j$

$\beta_j$  es el coeficiente de ponderación del criterio  $j$ , cumple que  $\sum \beta_j = 10$

MAX es el valor máximo de  $\sum \beta_j \cdot a_{ij}$  de entre los obtenidos por todas las alternativas.

MIN es el valor mínimo de  $\sum \beta_j \cdot a_{ij}$  de entre los obtenidos por todas las alternativas.

Con este modelo se pueden desarrollar diversos métodos de análisis multicriterio que, empleando diferentes criterios de aplicación de pesos, permiten alcanzar los objetivos del proceso de análisis de alternativas.

<sup>1</sup> Planning Assistance Through Technical Evaluation of Relevance Numbers

<sup>2</sup> Esto supone una modificación con respecto al método PATTERN clásico, en el cual el índice IP no se limita al intervalo mencionado; con esto se facilita la comparación de alternativas

#### 3.3.2. Metodología

Tras la obtención de los parámetros que valoran cada escenario para cada criterio marcado se plantea la necesidad de evaluar las alternativas de forma global, empleando procedimientos que permitan aplicar los coeficientes de ponderación necesarios sin distorsionar los resultados. Estos procedimientos son los siguientes:

##### 3.3.2.1. Análisis de robustez

Para efectuar el análisis de robustez se ha realizado un modelo numérico sin coeficientes de ponderación, aplicando por lo tanto todas las combinaciones posibles de pesos a todos los criterios marcados.

Se ha tratado con una hoja de cálculo que aplica todas las posibilidades de combinación de pesos, en incrementos múltiples de 5%, a los cuatro indicadores en estudio, dando un total de 1608 combinaciones.

Este procedimiento es el más desprovisto de componentes subjetivos, y pone de relieve qué alternativas presentan mejor comportamiento general con los criterios marcados, ya que se obtiene el número de veces que cada alternativa obtiene la máxima calificación.

##### 3.3.2.2. Análisis de robustez truncado

Consiste en aplicar el mismo procedimiento que en el análisis de robustez, realizar todas las combinaciones posibles de pesos a los diferentes criterios, pero limitando los valores posibles de cada peso a un cierto rango, de manera que se evita tomar en consideración en el análisis ponderaciones extremas que podrían distorsionarlo.

Para el presente análisis se ha establecido un rango de ponderaciones comprendido entre el 10% y el 60%; valores inferiores al 10% no pondrían en valor los parámetros con ese porcentaje, y mayores al 60% supondrían dar excesivo peso a alguno de ellos y mínimo por lo tanto al resto.

Depurando aquellas combinaciones que no cumplen con la condición antes citada, quedan un total 444 combinaciones.

### 3.3.2.3. Análisis de preferencias

El último procedimiento de análisis aplicado, método PATTERN, tiene en cuenta el orden de importancia relativa entre los criterios más apropiados para las características de la actuación.

El resultado permite asegurar el diagnóstico dado para cada alternativa por los demás análisis con respecto al grado de cumplimiento de los objetivos de la actuación.

Se aplican al modelo numérico los siguientes pesos:

- COSTE DE INVERSIÓN..... 30 %
- PLAZO DE EJECUCIÓN ..... 30 %
- AFECCIÓN HIDROGEOLÓGICA ..... 30 %
- AFECCIÓN MEDIOAMBIENTAL ..... 10 %

Parece razonable considerar la afección hidrogeológica una de las variables de mayor peso, ya que afecta directamente en la ejecución del soterramiento en cuanto a caudales de infiltración y tiene una gran importancia en el descenso de niveles piezométricos del acuífero con las consecuencias que conlleva.

El coste de inversión como el plazo de ejecución comparten el peso con afección hidrológica dado que se pretende racionalizar la afección económica de estudio y la duración de las obras que repercuten en todas las afecciones.

La afección medioambiental lleva el menor peso al entenderse que el grueso de la afección medioambiental es en fase de obra.

### 3.3.3. Resultado del análisis

Con la metodología antes descrita, se pasa a realizar el análisis partiendo de los valores calculados, y que se representan a continuación.

Alternativa	Puntuaciones			
	Coste de Inversión	Plazo de ejecución	Afección Hidrogeológica	Afección medioambiental
Al.2-Bombeo	9,54	10,00	5,54	8,88
Al.1-Jet	10,00	6,36	9,16	8,25

Dado que el análisis de robustez truncado contabiliza solo aquellas distribuciones de peso que tienen más sentido lógico, su resultado tiene mayor relevancia que el análisis de robustez simple; por lo que en el caso en el que el análisis de robustez truncado coincida como resultado con el análisis de preferencias, o que por lo menos el análisis de preferencia no arroje un resultado claramente contradictorio, se considera que la alternativa elegida ha sido determinada con suficiente objetividad.

Se detalla a continuación la tabla con los resultados del presente análisis:

Alternativa	Análisis multicriterio					Alternativa seleccionada
	Robustez		Robustez truncado [10-60]		Preferencia 30-30-30-10	
	Num.	%	Num.	%		
Alternativa 2-Bombeo	849	52,83%	237	53,38%	8,41	
Alternativa 1-Jet	758	47,17%	207	46,62%	8,48	

En el caso que aplica en este estudio, objetivamente no se puede determinar una alternativa como ganadora dado que **todos los resultados de los análisis realizados, robustez, robustez truncado, y preferencia**, arrojan resultados muy similares para las dos alternativas en estudio.

Ante tales resultados, **el presente Estudio Informativo no puede decantarse por ninguna de las dos alternativas planteadas, ya que ambas alternativas son de similar comportamiento ante las variables analizadas y se denotan como adecuadas, tanto técnica y ambientalmente, como en la afección hidrogeológica que producen, para la ejecución del soterramiento del ferrocarril en Torrelavega**, por lo que la selección de una de ellas quedará a expensas de análisis más detallados de posteriores fases de desarrollo.