



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*“Análisis de la localización de hidrolineras para el
transporte pesado en España”*

Autor: Unai de la Fuente Camino

Directores: Manuel Pérez Bravo

& Rafael Cossent Arín

Madrid

Julio 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título “Análisis de la localización de hidrolineras para el transporte pesado en España” en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025/2026 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): “La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

1. Generar lluvia de ideas sobre posibles enfoques del trabajo y sobre la estructura inicial de capítulos y secciones, que posteriormente he desarrollado y reordenado de forma independiente.
2. Apoyar la planificación del proyecto (cronograma, principales hitos y secuencia de tareas), utilizando las sugerencias de la IA solo como guía preliminar y definiendo después el plan definitivo por mi cuenta.
3. Realizar una investigación inicial de carácter exploratorio, identificando autores, conceptos y documentos relevantes sobre hidrógeno, AFIR y modelos de localización, que luego he buscado, leído y citado directamente a partir de las fuentes originales.
4. Obtener propuestas de posibles indicadores y variables a considerar en el análisis (por ejemplo, tipos de costes o parámetros de demanda), que he seleccionado, formalizado y calibrado posteriormente según mis propios criterios técnicos.
5. Plantear alternativas de formulación conceptual de algunos modelos (por ejemplo, diferentes formas de expresar la lógica de cobertura o de representar la demanda), que han servido como punto de partida para el diseño final del modelo implementado en Python.

Firmado (alumno): Unai de la Fuente Camino



Fecha: 5 de julio de 2026

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
 Firmado digitalmente por PEREZ BRAVO MANUEL - 49114355V Fecha: 2026.07.06 20:15:41 +02'00'	COSSENT ARIN RAFAEL - 71434814B Firmado digitalmente por COSSENT ARIN RAFAEL - 71434814B Fecha: 2026.07.06 21:32:39 +02'00'
Fdo:	Fdo:
Fecha:	Fecha:



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

*“Análisis de la localización de hidrolineras para el
transporte pesado en España”*

Autor: Unai de la Fuente Camino

Directores: Manuel Pérez Bravo

& Rafael Cossent Arín

Madrid

Julio 2026

ANÁLISIS DE LA LOCALIZACIÓN DE HIDROLINERAS PARA EL TRANSPORTE PESADO EN ESPAÑA

Autor: de la Fuente Camino, Unai

Directores: Pérez Bravo, Manuel y Cossent Arín, Rafael

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: hidrógeno verde; estaciones de recarga; transporte pesado; red TEN-T; MILP; AFIR; LCOH en estación; localización de instalaciones; infraestructura de combustibles alternativos.

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

La descarbonización del transporte pesado por carretera es un pilar crítico de la agenda climática de la UE, siendo responsable de más de una cuarta parte de las emisiones del transporte rodado. El hidrógeno renovable emerge como la solución técnica para trayectos de larga distancia donde el peso de las baterías y los tiempos de carga limitan la operatividad del vehículo eléctrico a baterías.

Sin embargo, el hidrógeno enfrenta una **barrera económica estructural**: un camión diésel opera con costes de combustible de entre 0,42 y 0,49 €/km, mientras que el hidrógeno se sitúa inicialmente por encima de los 0,60-0,68 €/km. Este escenario evidencia que, al requerir el hidrógeno una **infraestructura de suministro dedicada y exclusiva**, el caso de negocio resulta poco atractivo en las fases iniciales de despliegue. En este contexto, se hace indispensable un marco de **apoyo y coordinación en la infraestructura** como el que proporciona el **Reglamento AFIR (UE 2023/1804)**, que asegura la disponibilidad de suministro mediante obligaciones vinculantes para 2030 (una estación cada 200 km y en cada nodo urbano), independientemente de la demanda inicial. Este trabajo localiza la **red mínima** obligatoria en España y cuantifica el impacto económico de esta “universalidad regulatoria”.

2. METODOLOGÍA Y MODELO DE OPTIMIZACIÓN

El estudio emplea un enfoque interdisciplinar que combina ingeniería de redes, investigación operativa y análisis tecno-económico.

- **Procesamiento de la Red:** Se ha construido un grafo topológico a partir de la cartografía oficial de la red TEN-T en la plataforma **Hermes**. Utilizando la librería *NetworkX*, se

simplificó la red básica eliminando nodos redundantes para optimizar el cálculo de rutas mínimas mediante el algoritmo de Dijkstra.

- **Modelo de Optimización (MILP):** Se ha desarrollado un modelo de Programación Lineal Entera Mixta inspirado en el *Flow-Refueling Location Model* (FRLM), adaptado a un conjunto discreto de **455 puntos de control** interurbanos para verificar la cobertura reglamentaria.

Formulación Matemática (Función Objetivo): El modelo busca maximizar la utilidad de la red penalizando simultáneamente la activación de estaciones interurbanas para identificar la red mínima:

$$\max Z = \sum_{i \in I} P_i x_i - \sum_{i \in I_{\text{int}}} \omega x_i$$

donde x_i es la variable binaria que indica si se selecciona la localización i , P_i es la prioridad asociada a la demanda captada por la estación i , I_{int} es el subconjunto de candidatos interurbanos y ω es la penalización aplicada a cada estación interurbana adicional.

(Sujeto a restricciones de cobertura AFIR en cada punto de control y de separación mínima de 30 km entre estaciones para evitar redundancias)

3. ANÁLISIS DE DEMANDA Y PARÁMETROS ECONÓMICOS

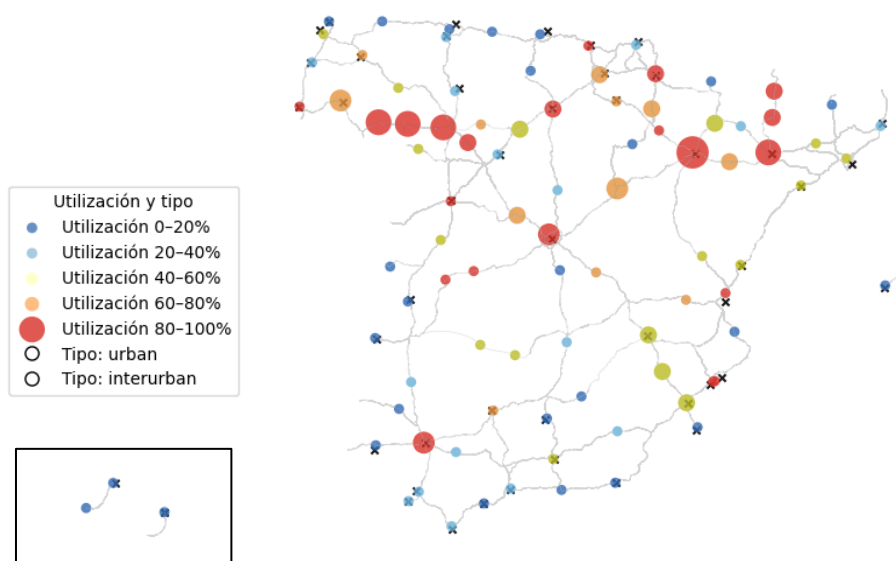
La demanda potencial se ha modelizado proyectando flujos de mercancías de la base de datos **ETISPLUS**, actualizados a 2024 con datos de Eurostat.

- **Hipótesis 2030:** Se asume una penetración del **1% de camiones de hidrógeno** en la flota pesada, una probabilidad de parada del 10% para estaciones interurbanas (5% para urbanas) y un suministro medio de **60 kg de H2** por repostaje.
- **Evaluación Económica:** Se emplea el **Coste Nivelado del Hidrógeno (LCOH)** en surtidor, asumiendo una estación CSD (Compresión, Almacenamiento y Dispensación) abastecida externamente por camión cisterna. Se aplica un WACC del 8% y una vida útil de 20 años.

4. RESULTADOS: LA RED MÍNIMA ESPAÑOLA

El modelo identifica una red óptima de **92 hidrolineras** (47 urbanas fijas y 45 interurbanas seleccionadas), garantizando la continuidad territorial en toda la red básica TEN-T.

Ilustración 1: Mapa de calor de las localizaciones finales de la red mínima AFIR en España



Análisis de la Inversión y Operación: La inversión total estimada (CAPEX) asciende a **219,6 M€**. Los resultados revelan una red fuertemente jerarquizada:

- **Utilización:** La utilización media global es del **46,6%**. No obstante, el **28,3% de las estaciones** (principalmente en nodos urbanos obligatorios de baja demanda) operan con utilidades residuales (<20%), actuando únicamente como “piezas de cierre” reglamentarias.
- **Distribución de Costes:** En los nodos de alta demanda, el LCOH se sitúa entre **7,5 y 8,0 €/kg**. En tramos periféricos, la infrautilización dispara el coste por encima de los **10 €/kg**.

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y CRÍTICA REGULATORIA

Para evaluar la robustez de la red y el impacto de las exigencias normativas, el estudio somete al modelo a dos análisis de sensibilidad que cuestionan los pilares del Reglamento AFIR: la separación máxima entre estaciones y el dimensionamiento mínimo de los activos.

En primer lugar, se comparan tres escenarios de separación geográfica: uno restrictivo (150 km), el escenario base (200 km) y uno laxo (250 km). Este análisis revela un compromiso crítico entre la capilaridad territorial y la eficiencia operativa: endurecer la norma hacia los 150 km obliga a densificar la red hasta las 102 estaciones, lo que eleva la inversión a 237,6 M€ y diluye la demanda, reduciendo la utilización media al 45,4%. Por el contrario, ampliar el margen a 250 km permite resolver la conectividad nacional con solo 83 nodos, optimizando la utilización hasta el 47%.

Tabla 1: Resumen de resultados por sensibilidad de distancia máxima

	150km	200km	250km
Hidrolineras Urbanas	47	47	47
Hidrolineras Interurbanas	55	45	36
Inversión total	237,6 M€	219,6 M€	203,4 M€
Utilización	45,4%	46,6%	47,0%

Complementariamente, se analiza el impacto de la rigidez del tamaño mínimo de 1 t/día exigido por AFIR. Los resultados demuestran que permitir una mayor flexibilidad regulatoria, reduciendo el estándar a **0,5 t/día** en los tramos de menor densidad, transformaría la viabilidad económica del sistema.

Bajo este escenario flexible, la utilización media de la red saltaría del **46,6% al 58,4%**, permitiendo además un ahorro directo en inversión de **47 millones de euros** al ajustar mejor las capacidades nominales a la demanda real. Este hallazgo evidencia que el estándar actual actúa como una barrera para un despliegue racional, forzando un sobredimensionamiento que dispara el LCOH en ubicaciones periféricas con demandas residuales y priorizando la simetría administrativa sobre la eficiencia logística.

6. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

El presente trabajo concluye que, si bien es técnicamente posible articular la red mínima exigida por AFIR en España, su diseño actual presenta ineficiencias derivadas de una “**simetría administrativa**” que ignora la heterogeneidad del transporte nacional.

- **El papel de los nodos urbanos en la conectividad:** La obligación de instalar estaciones en todos los nodos urbanos responde a la necesidad de garantizar capilaridad en la red. Pese a su posible infrautilización inicial, estas localizaciones desempeñan un papel estratégico cerrando la red y asegurando la continuidad territorial.
- **Adecuación de los requerimientos de AFIR:** El análisis demuestra que el requisito de 1 t/día en tramos de baja densidad sugiere que los requerimientos podrían ser revisados, permitiendo una mayor flexibilidad que permita optimizar la inversión y acompasar mejor la capacidad con la demanda real.
- **Una Red de Primera Implantación:** En definitiva, la red AFIR a 2030 debe entenderse como una infraestructura de primera implantación que puede llegar a necesitar apoyo para su funcionamiento cuando la utilización sea baja en fase de despliegue. Su valor reside en su papel habilitador para la transición tecnológica, facilitando que el coste operativo del hidrógeno pueda converger con el tiempo hacia soluciones más competitivas.

En resumen, los resultados proporcionan la primera base espacial y cuantitativa para el despliegue del hidrógeno en España, advirtiendo que el éxito de esta transición dependerá de la **capacidad de planificación y de la agregación de la demanda** en las localizaciones adecuadas para que el LCOH pueda ser competitivo frente a otros vectores energéticos.

ANALYSIS OF HYDROGEN REFUELLING STATION LOCATION FOR HEAVY-DUTY TRANSPORT IN SPAIN

Author: de la Fuente Camino, Unai

Supervisors: Pérez Bravo, Manuel y Cossent Arín, Rafael

Collaborating Institution: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Keywords: green hydrogen; refuelling stations; heavy-duty transport; TEN-T network; MILP; AFIR; LCOH at the station; facility location; alternative fuels infrastructure.

1. INTRODUCTION AND MOTIVATION

Decarbonizing heavy-duty road transport is a critical pillar of the EU's climate agenda, as it is responsible for more than a quarter of road transport emissions. Renewable hydrogen emerges as the technical solution for long-distance routes where battery weight and charging times limit the feasibility of battery electric vehicles.

However, hydrogen faces a **structural economic barrier**: while a diesel truck operates with fuel costs between 0.42 and 0.49 €/km, hydrogen is initially positioned above 0.60-0.68 €/km. This scenario highlights that, as hydrogen requires a dedicated and exclusive supply infrastructure, the business case is unattractive in the early stages of deployment. In this context, a framework for infrastructure support and coordination, such as that provided by the AFIR Regulation (EU 2023/1804), is essential, as it ensures the availability of supply through binding obligations for 2030 (one refuelling station every 200 km and at every urban node), regardless of initial demand. This study identifies the minimum mandatory network in Spain and quantifies the economic impact of this “regulatory universality”.

2. METHODOLOGY AND OPTIMIZATION MODEL

The study employs an interdisciplinary approach combining network engineering, operations research, and techno-economic analysis.

- **Network Processing:** A topological graph was constructed from the official TEN-T network mapping on the **Hermes** platform. Using the *NetworkX* library, the core network was simplified by removing redundant nodes to optimize the calculation of shortest paths via Dijkstra's algorithm.
- **Optimization Model (MILP):** A Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model inspired by the *Flow-Refuelling Location Model* (FRLM) was developed, adapted to a discrete set of **455 interurban control points** to verify regulatory coverage.

Mathematical Formulation (Objective Function): The model seeks to maximize network utility while simultaneously penalizing the activation of interurban stations to identify the minimum network:

$$\max Z = \sum_{i \in I} P_i x_i - \sum_{i \in I_{\text{int}}} \omega x_i$$

where x_i is the binary variable indicating whether the location is selected i , P_i is the priority associated with the demand captured by the station i , I_{int} is the subset of interurban candidates, and ω is the penalty applied to each additional interurban station.

(Subject to AFIR coverage constraints at each control point and a minimum separation of 30 km between stations to avoid redundancy).

3. DEMAND ANALYSIS AND ECONOMIC PARAMETERS

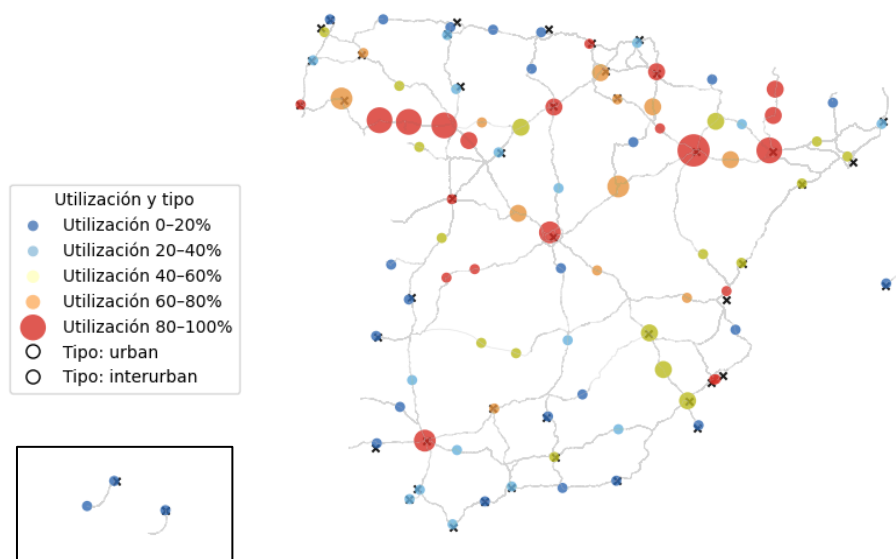
Potential demand was modelled by projecting freight flows from the **ETISPLUS** database, updated to 2024 with Eurostat data.

- **2030 Hypothesis:** A **1% penetration of hydrogen trucks** in the heavy-duty fleet is assumed, with a 10% stopping probability for interurban stations (5% for urban) and an average supply of **60 kg of H₂** per refuelling.
- **Economic Evaluation:** The **Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)** at the pump is used, assuming a CSD (Compression, Storage, and Dispensing) station supplied externally by tanker truck. A WACC of 8% and a useful life of 20 years are applied.

4. RESULTS: THE SPANISH MINIMUM NETWORK

The model identifies an optimal network of **92 refuelling stations** (47 fixed urban and 45 selected interurban), guaranteeing territorial continuity across the entire core TEN-T network.

Figure 1: Heat map of the final locations of the minimum AFIR network in Spain



Investment and Operational Analysis: The total estimated investment (CAPEX) amounts to **€219.6 million**. The results reveal a highly hierarchical network:

- **Utilization:** The overall average utilization is **46.6%**. However, **28.3% of the stations** (mainly in mandatory urban nodes with low demand) operate at residual utilization levels (<20%), acting solely as regulatory “closure pieces”.
- **Cost Distribution:** In high-demand nodes, the LCOH ranges between **7.5 and 8.0 €/kg**. In peripheral sections, underutilization drives the cost above **10 €/kg**.

5. SENSITIVITY ANALYSIS AND REGULATORY CRITIQUE

To assess the robustness of the network and the impact of regulatory requirements, the study subjects the model to two sensitivity analyses that challenge the core pillars of the AFIR Regulation: the maximum distance between stations and the minimum sizing of assets.

First, three geographic spacing scenarios are compared: a restrictive case (150 km), the baseline scenario (200 km), and a relaxed case (250 km). This analysis reveals a critical trade-off between

territorial coverage and operational efficiency: tightening the requirement to 150 km forces the network to densify up to 102 stations, increasing investment to €237.6 million and diluting demand, which reduces average utilization to 45.4%. In contrast, extending the limit to 250 km allows national connectivity to be achieved with only 83 nodes, optimizing utilization to 47%.

Table 1: Summary of results by maximum distance sensitivity

	150km	200km	250km
Urban HRS	47	47	47
Interurban HRS	55	45	36
Total investment	237.6 M€	219.6 M€	203.4 M€
Utilisation	45.4%	46.6%	47.0%

Additionally, the impact of the minimum size of 1 t/day required by AFIR is analysed. The results show that allowing greater regulatory flexibility, reducing the standard to **0.5 t/day** in lower density sections, would transform the system's economic viability.

Under this flexible scenario, average network utilization would jump from **46.6% to 58.4%**, also allowing for a direct investment saving of **€47 million** by better adjusting nominal capacities to real demand. This finding proves that the current standard acts as a barrier to rational deployment, forcing over-dimensioning in locations with residual demand.

6. CONCLUSIONS AND IMPLICATIONS

This work concludes that while it is technically possible to articulate the minimum network required by AFIR in Spain, its current design presents inefficiencies derived from an “**administrative symmetry**” that ignores national transport heterogeneity.

- **The role of urban nodes in connectivity:** The requirement to install stations at all urban nodes stems from the need to ensure the network’s reach into the community. Despite their potential initial underutilisation, these locations play a strategic role in completing the network and ensuring territorial continuity.
- **Adjustment of AFIR requirements:** The analysis shows that the requirement of 1 t/day on low-density sections suggests that the requirements could be revised, allowing for greater flexibility to optimise investment and better align capacity with actual demand.
- **A Initial Deployment Network:** Ultimately, the AFIR network by 2030 should be understood as an initial deployment infrastructure that may require operational support when utilisation is low during the roll-out phase. Its value lies in its role as an enabler for the technological transition, facilitating the convergence of hydrogen’s operating costs over time towards more competitive solutions.

In summary, the results provide the first spatial and quantitative basis for the roll-out of hydrogen in Spain, whilst noting that the success of this transition will depend on the **capacity for planning and the aggregation of demand** in suitable locations so that LCOH can be competitive against other energy carriers.

ÍNDICE

Capítulo 1.	Introducción	17
1.1	Contexto y Motivación	17
1.2	Objetivos del Trabajo	20
1.3	Alineación con Objetivos de Desarrollo Sostenible	22
1.4	Alcance y Limitaciones	23
1.5	Estructura del Documento	26
Capítulo 2.	Marco Normativo y Regulatorio	27
2.1	El Reglamento AFIR	27
2.2	La Red TEN-T en España	30
2.3	Estrategia Nacional de Hidrógeno	32
2.4	Implicaciones para la Planificación de Infraestructuras	34
Capítulo 3.	Revisión de la Literatura	36
3.1	Modelos de Localización de Instalaciones	36
3.2	Infraestructura de Hidrógeno	39
3.3	Análisis Económico de Estaciones de Hidrógeno	42
3.4	Contribución del Estudio	45
Capítulo 4.	Datos y Fuentes de Información	49
4.1	Red TEN-T	49
4.2	Demanda de Transporte Pesado	51
4.3	Parámetros Económicos y Tecnológicos	53
Capítulo 5.	Metodología	56
5.1	Secuencia Metodológica	56
5.2	Preprocesamiento de la Red y Elementos espaciales	57
5.3	Construcción de la Capa de Demanda	60
5.4	Construcción de Nodos, Candidatos y Puntos de Control	63
5.5	Formulación del Modelo de Optimización	68
5.6	Capacidad, Utilización y LCOH por Hidrolinea	71
Capítulo 6.	Resultados	75
6.1	Red resultante	75
6.2	Cobertura y Puntos de Control	76
6.3	Demanda Asignada a la Red	78

6.4	Utilización de las Estaciones	82
6.5	Resultados Económico-Operativos	85
6.6	Sensibilidades al Criterio AFIR.....	88
Capítulo 7.	Discusión y Conclusiones.....	92
7.1	Lectura Integrada de la Red	92
7.2	Utilización, Dimensionamiento y Viabilidad Económica.....	93
7.3	Papel del Criterio AFIR en el Diseño.....	95
7.4	Principales Conclusiones e Implicaciones	97
7.5	Limitaciones y Líneas Futuras	99
Capítulo 8.	Bibliografía.....	102
Capítulo 9.	ANEXOS.....	109
9.1	Anexo I – Resultados numéricos escenario de sensibilidad 150km.....	109
9.2	Anexo II – Resultados numéricos escenario sensibilidad 250km.....	112
9.3	Anexo III – Resultados numéricos escenario sensibilidad capacidad mínima de 0,5 t/día.....	115
9.4	Anexo IV – Código Python para el tratamiento de la red TEN-T y proyección de flujos de demanda sobre la misma	118
9.5	Anexo V – Código Python para la optimización espacial mediante MILP	134

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

La descarbonización del transporte por carretera se ha convertido en una de las prioridades de la política climática y energética europea, especialmente tras las crisis recientes en los mercados energéticos y las disrupciones en las cadenas de suministro de combustibles fósiles, que han evidenciado la exposición de Europa a shocks externos de precios y disponibilidad. En respuesta, la agenda comunitaria promueve una sustitución progresiva de combustibles fósiles importados por vectores energéticos de producción más doméstica, como la electricidad o ciertos combustibles renovables y sintéticos, tanto por motivos climáticos como de seguridad de suministro.

Sin embargo, el proceso no presenta la misma dificultad en todos los segmentos.

En el caso del transporte pesado de mercancías, la transición resulta especialmente compleja por una combinación de factores: un consumo energético más elevado por el peso del vehículo, recorridos frecuentes de media y larga distancia, una alta dependencia de la disponibilidad del vehículo y unos márgenes operativos que hacen difícil asumir tiempos de parada prolongados o pérdidas relevantes de flexibilidad. Además, aunque los vehículos pesados representan una fracción relativamente pequeña del parque, los camiones y autobuses pesados (ACEA, 2023; Comisión Europea, 2023) son responsables de algo más de una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte por carretera en la Unión Europea, lo que significa que una proporción importante del problema climático asociado al transporte sigue concentrada en el transporte profesional de mercancías.

En este contexto, el hidrógeno renovable ha ido ganando protagonismo como alternativa para aquellos usos donde otras soluciones presentan más limitaciones. Su interés no debe entenderse en términos absolutos, como si fuese una respuesta universal para todo el transporte por carretera, sino en relación con aplicaciones concretas en las que la autonomía, el tiempo de repostaje o la continuidad de la operación siguen siendo variables determinantes. Esto es especialmente visible en el transporte pesado de larga distancia, donde la lógica de explotación de la flota obliga a valorar no solo la eficiencia energética de la tecnología, sino también su encaje real en la operativa diaria del servicio.

Sin embargo, este potencial operativo se enfrenta a una realidad económica compleja. Mientras que un camión diésel de larga distancia en España opera con costes de combustible de entre 0,42 y 0,49 €/km, y el camión eléctrico a baterías puede situarse por debajo de los 0,30 €/km, el hidrógeno parte de una clara desventaja en coste por kilómetro. Esta brecha de competitividad subraya que el desarrollo de la infraestructura no puede responder solo a una demanda consolidada, sino que debe ser una condición previa habilitada por marcos vinculantes como el Reglamento AFIR.

Ahora bien, el desarrollo del hidrógeno en movilidad depende de algo más que de la madurez de los vehículos o de la evolución de sus costes. Depende también de que exista una red de repostaje suficientemente accesible y mínimamente continua. Sin esa red, la adopción de vehículos de hidrógeno queda bloqueada por una dinámica conocida: los operadores no incorporan vehículos si no disponen de garantías razonables de suministro, mientras que los promotores de estaciones no invierten si la demanda inicial sigue siendo demasiado reducida. En fases tempranas, por tanto, la infraestructura no puede interpretarse solo como respuesta a una demanda ya consolidada; en buena medida, es una condición previa para que esa demanda llegue a existir.

Es precisamente en ese punto donde adquiere relevancia AFIR. El Reglamento (UE) 2023/1804 introduce un cambio importante en la política europea de infraestructuras de combustibles alternativos, porque sustituye un marco más orientativo por obligaciones de despliegue de carácter vinculante. En el caso del hidrógeno, el reglamento exige la existencia de estaciones de acceso público a lo largo de la red básica TEN-T y en los nodos urbanos, bajo unos criterios concretos de cobertura territorial y capacidad mínima. La importancia de AFIR no reside únicamente en fijar una fecha objetivo o en establecer un número aproximado de estaciones, sino en convertir el despliegue en una obligación verificable sobre una red concreta.

Este punto merece algo más de atención. Cuando una norma establece que debe existir infraestructura de hidrógeno a lo largo de la red básica y en determinados nodos, el problema deja de ser simplemente tecnológico o incluso meramente económico. Pasa a ser también territorial.

Lo que se plantea es una obligación de cobertura que debe materializarse sobre corredores, distancias y localizaciones reales. De ahí que AFIR no solo impulse el despliegue, sino que también cambie la forma de pensar la planificación: obliga a pasar de una lógica de inversión selectiva a una lógica de diseño de red. Además, esa lógica de red introduce una tensión evidente entre cobertura y rentabilidad. Una infraestructura pensada para cumplir AFIR no tiene por qué coincidir con la que surgiría de

forma espontánea si la localización de las estaciones dependiera únicamente de la demanda observada o esperada a corto plazo. Habrá emplazamientos con una justificación comercial clara, pero también otros donde la razón principal para instalar una estación sea garantizar continuidad territorial, cerrar huecos espaciales o asegurar la accesibilidad en nodos exigidos por la regulación.

En esos casos, una utilización inicial modesta no sería necesariamente un síntoma de mala planificación, sino una consecuencia previsible de una política de despliegue orientada a construir red antes de que exista una demanda madura en todos los tramos.

Esta rigidez normativa, sin embargo, plantea un interrogante de fondo sobre la eficiencia del diseño de red propuesto. Al imponer una cobertura homogénea (cada 200 km) y un tamaño mínimo preestablecido (1 t/día), AFIR ignora la naturaleza profundamente heterogénea del transporte en España, donde conviven corredores de altísima densidad con tramos periféricos de tráfico residual. Por tanto, la justificación de este TFM no reside solo en localizar los puntos de cumplimiento, sino en analizar críticamente es el camino más eficiente para 2030 o si, por el contrario, genera una infraestructura sobredimensionada en zonas donde la demanda tardará décadas en madurar

El caso español resulta especialmente adecuado para analizar esta cuestión. España cuenta con una red viaria extensa, con más de 160.000 km de carreteras y autopistas en servicio, incluyendo una de las mayores redes de vías de alta capacidad de Europa (Worlddata, 2023; ACEA, 2025), y con conexiones estratégicas hacia Francia a través de los corredores pirenaicos principales (Irun/Biriatou y La Jonquera/Le Perthus). A ello se suma una red portuaria y logística de primer orden, con más de 40 puertos de interés general y un volumen de tráfico que sitúa a España entre los tres primeros países de la Unión Europea en mercancías movidas por vía marítima (ICEX – Invest in Spain, 2026; Eurostat, 2024). Pero también existen amplias zonas donde la densidad de tráfico es menor y donde la continuidad de la red exige decisiones menos evidentes desde el punto de vista económico. Esa combinación hace que la aplicación práctica de AFIR no pueda reducirse a localizar estaciones en unos pocos polos de demanda, sino que exige pensar en una estructura territorial más amplia, donde conviven corredores muy intensos con otros tramos cuya importancia deriva menos del volumen actual de tráfico que de su papel dentro de la conectividad general de la red.

En este trabajo, la modelización de la demanda se centra en el transporte pesado por carretera, al ser el segmento en el que el hidrógeno presenta un interés más claro dentro del horizonte regulatorio considerado y aquel en el que la infraestructura de repostaje adquiere una relevancia más inmediata.

Esta decisión metodológica no implica, sin embargo, que las estaciones deban entenderse como infraestructura exclusiva para vehículos pesados. Al tratarse de estaciones de acceso público, podrían atender también a vehículos ligeros de hidrógeno, aunque dicha demanda potencial no se incorpore explícitamente en el escenario base del análisis.

Desde un punto de vista académico, el interés del problema es también evidente. Existen estudios que proyectan demanda, estiman costes o plantean escenarios generales de despliegue, pero son menos frecuentes los trabajos que trasladan una obligación regulatoria concreta a un problema formal de localización sobre una red viaria real, incorporando distancias efectivas de red, cobertura obligatoria de nodos urbanos y una evaluación posterior de las implicaciones operativas y económicas de la solución obtenida. En ese sentido, el presente trabajo se sitúa en la intersección entre regulación, planificación espacial y análisis económico de infraestructuras.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una aproximación para la localización de una red mínima de estaciones de repostaje de hidrógeno en la red viaria española que permita cumplir las exigencias de cobertura establecidas por el Reglamento AFIR para el horizonte de 2030, tomando como referencia los datos disponibles de transporte pesado de mercancías. Esta elección responde a que el análisis de demanda del trabajo se apoya en esa base de datos y a que dicho segmento constituye el principal foco del problema planteado.

A partir de esta formulación base, el estudio explora también la sensibilidad de la solución frente a distintos parámetros de diseño, en particular la distancia máxima entre estaciones, y compara las configuraciones resultantes con las reglas de AFIR, que fijan requisitos mínimos de cobertura a escala de la red TEN-T pero no incorporan de forma detallada la distribución territorial de la demanda de hidrógeno.

A partir de este objetivo general, el trabajo persigue varios objetivos específicos:

- El primero consiste en construir una representación operativa de la red TEN-T española adecuada para el análisis de distancias y cobertura. Esto exige trabajar con una red topológicamente consistente, capaz de reflejar no solo la geometría del trazado, sino también la conectividad efectiva entre sus distintos tramos.

- El segundo objetivo es definir un conjunto de localizaciones candidatas para la implantación de estaciones que resulte suficientemente amplio como para no empobrecer la solución, pero también lo bastante acotado como para hacer tratable el problema de optimización. No se trata solo de generar puntos sobre el mapa, sino de construir una base espacial razonable sobre la que después pueda formularse el modelo con sentido práctico.
- El tercer objetivo consiste en formular y resolver un modelo de optimización que permita identificar el número mínimo de estaciones necesario para garantizar el cumplimiento de AFIR en la red considerada. Esto incluye, por un lado, la cobertura de los nodos urbanos exigidos por la regulación y, por otro, el cumplimiento de la separación máxima admisible entre puntos de repostaje a lo largo de la red básica. Junto a ello, el modelo incorpora también criterios adicionales de consistencia espacial entre estaciones, de manera que la solución obtenida no sea solo factible desde un punto de vista normativo, sino también razonable desde el punto de vista de su implantación territorial.
- Un cuarto objetivo es verificar que la solución obtenida satisface efectivamente las condiciones de cobertura que motivan el trabajo. Aunque el modelo se construye precisamente para responder a esas restricciones, resulta necesario comprobar después que el resultado mantiene el cumplimiento de AFIR cuando se examina sobre la red y no únicamente en términos abstractos de formulación.

El trabajo incorpora además un objetivo de análisis operativo y económico posterior. Una vez identificada la red mínima compatible con AFIR, se pretende evaluar qué implicaciones tiene esa solución en términos de utilización esperada y de coste del suministro. En esta parte, el interés no está en redefinir la localización óptima desde una lógica puramente económica, sino en entender qué consecuencias se derivan de haber priorizado el cumplimiento regulatorio y la continuidad territorial sobre la rentabilidad inmediata de cada emplazamiento.

Dentro de esa evaluación, se incluye el cálculo de indicadores económicos como el coste nivelado del hidrógeno y el análisis del ratio de utilización, tanto para el conjunto de la red como para cada localización seleccionada.

Esto permite observar hasta qué punto una infraestructura necesaria desde el punto de vista regulatorio coincide o no con una infraestructura intensamente utilizada en sus primeras etapas de despliegue. Precisamente ahí aparece una de las preguntas de fondo del trabajo: cuál es el coste, en

términos de utilización y esfuerzo económico, de garantizar una cobertura mínima sobre toda la red exigida.

Por último, el trabajo persigue un objetivo metodológico más amplio. No se trata solo de obtener una solución aplicada al caso español, sino también de plantear un procedimiento de análisis que pueda reutilizarse en otros contextos con adaptaciones limitadas. En ese sentido, el estudio busca ofrecer una forma de abordar el problema que conecte regulación, red viaria, localización de infraestructura y evaluación económica dentro de un mismo marco de trabajo.

1.3 ALINEACIÓN CON OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Este proyecto se alinea con múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), demostrando su impacto más allá del ámbito ingenieril:

ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante

El proyecto habilita el uso de **hidrógeno renovable** (RFNBO) como fuente de combustible para el transporte. Este hidrógeno puede obtenerse limpiamente a través de la electrólisis alimentada por fuentes renovables (solar y eólica).

- **Contribución:** Al optimizar la distribución espacial de las HRS en España, se busca reducir el LCOH y aumentar la penetración de fuentes renovables en el sector transporte. Esto asegura que la energía utilizada para el transporte pesado sea limpia y potencialmente más asequible a largo plazo.

ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura

El TFM contribuye al desarrollo de infraestructura crucial y fomenta la innovación tecnológica.

- **Infraestructura Resiliente:** La planificación se centra en la red TEN-T, una infraestructura esencial. El despliegue de una red pan-europea de hidrógeno, la denominada “**Hydrogen Backbone**”, es un requisito para maximizar el uso de recursos y asegurar el equilibrio entre la oferta y la demanda de H₂ en diferentes regiones. La adopción de HDV FCEV de hidrógeno (Categorías M2, M3, N2, N3) impulsa la innovación.

- **Modelización Avanzada:** El uso de modelos MILP avanzados como el FRLM y la integración geoespacial (GIS) representa una innovación metodológica en la planificación de infraestructura.

ODS 11 y ODS 13: Ciudades Sostenibles y Acción por el Clima

Al enfocarse en el transporte pesado, una de las mayores fuentes de emisiones, el proyecto tiene un impacto directo en la lucha contra el cambio climático y la calidad de vida urbana.

- **Mitigación Climática:** La meta es apoyar la sustitución de combustibles fósiles, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Movilidad Sostenible:** El requisito AFIR de localizar HRS en **nodos urbanos**, para el repostaje en destino de los camiones de reparto apoya la creación de ciudades más limpias y sostenibles, reduciendo la contaminación atmosférica local asociada al tráfico HDV.

1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES

El trabajo se circunscribe al estudio de la red viaria española integrada en la red TEN-T, con especial atención a los tramos y nodos para los que AFIR establece exigencias de cobertura en el horizonte de 2030. El análisis se plantea, por tanto, en una escala territorial de red y no en la escala de proyecto individual de cada emplazamiento. Esto significa que el interés principal está en la configuración espacial de una red mínima compatible con la regulación, más que en el diseño de detalle de cada estación considerada de forma aislada.

Desde el punto de vista de la demanda, el trabajo se centra en el transporte pesado de mercancías por carretera y utiliza, como base, la información disponible para este segmento. Esta elección limita explícitamente el alcance del análisis: la red resultante no pretende representar toda la demanda potencial de hidrógeno en carretera (por ejemplo, autobuses, distribución urbana o turismos), sino aproximar la infraestructura necesaria para atender a los corredores asociados al transporte pesado de mercancías, que constituye el núcleo del problema regulatorio considerado y para el que se dispone de una base empírica más consistente.

En consecuencia, aunque las estaciones se entienden como infraestructura de acceso público y podrían atender también a vehículos ligeros de hidrógeno, esa demanda adicional no forma parte del escenario base.

El horizonte temporal del estudio viene marcado por el cumplimiento de AFIR en 2030. Por ello, el modelo no reproduce una trayectoria dinámica de despliegue año a año ni simula la evolución progresiva de la demanda, de los costes o de la penetración tecnológica en el parque móvil. El enfoque adoptado es esencialmente estático: se construye una imagen de la red mínima necesaria bajo un conjunto de hipótesis representativas del horizonte regulatorio considerado.

Esta simplificación permite centrar el análisis en la pregunta principal del trabajo, aunque deja fuera aspectos que serían propios de un modelo dinámico de transición.

También conviene precisar el alcance del propio modelo de localización. La formulación desarrollada busca garantizar cobertura territorial y cumplimiento normativo sobre la red, no reproducir con detalle todas las decisiones logísticas o comerciales que intervienen en la explotación real de una estación. En ese sentido, el modelo no incorpora, por ejemplo, estrategias empresariales de entrada secuencial, competencia entre operadores, decisiones de tarificación o posibles acuerdos de suministro entre agentes privados.

En la parte económica, el análisis se centra en estimar las implicaciones de la red obtenida una vez resuelto el problema de cobertura. Para ello, la configuración final adoptada asume que el hidrógeno es suministrado a las estaciones mediante camión cisterna desde instalaciones externas de producción, por lo que no se modela la producción in situ mediante electrolizadores en cada emplazamiento.

Esta decisión reduce el nivel de detalle tecnológico del estudio, pero permite trabajar con un esquema más coherente con el planteamiento final del trabajo y concentrar la atención en los costes de suministro, almacenamiento, compresión y dispensación asociados a cada localización. Del mismo modo, la evaluación económica no pretende sustituir al análisis de viabilidad de un proyecto ejecutivo real. No se modelan elementos como la tramitación urbanística, la disponibilidad efectiva del suelo, las condiciones particulares de acceso a cada parcela, la fiscalidad específica aplicable, ni las posibles diferencias contractuales entre operadores. Tampoco se incorporan ayudas públicas concretas como parte estructural del escenario base.

La renuncia al modelado de producción *on-site* no es solo una simplificación de costes, sino una decisión estratégica para evitar la incorporación de una capa de complejidad técnica asociada a la capacidad de acceso y saturación de la red eléctrica. Incluir dicha variable exigiría un análisis de flujos de carga en media y alta tensión que desbordaría el objetivo de planificación logística de este trabajo.

Por ello, los resultados económicos deben leerse como órdenes de magnitud útiles para comparar localizaciones y entender las implicaciones de la red mínima obtenida, no como presupuestos cerrados de inversión para cada estación.

Otra limitación importante reside en el tratamiento de la demanda y su asignación a las estaciones. El análisis combina hipótesis agregadas sobre intensidad de tráfico, penetración del hidrógeno y consumo específico con reglas simplificadas de captura espacial para estimar qué fracción de los flujos repostaría en cada emplazamiento. En la práctica, esto significa que la demanda estimada en cada hidrolinera debe interpretarse como una aproximación razonable a escala de red, pero no como una predicción exacta del volumen de repostaje que tendría lugar en cada punto concreto; esta limitación no invalida el ejercicio, aunque sí aconseja prudencia en la lectura de los resultados más desagregados.

A ello se suma que el modelo no incorpora algunos condicionantes físicos e infraestructurales que podrían ser relevantes en fases posteriores de desarrollo.

Entre ellos destacan las restricciones de conexión a red eléctrica ya mencionadas, las particularidades orográficas que pueden alterar el consumo real de los vehículos en ciertos corredores, o las limitaciones locales de accesibilidad y operación de una estación concreta. Estos factores pueden influir en la viabilidad final de determinados emplazamientos, pero quedan fuera del nivel de resolución adoptado en este trabajo. Su incorporación exigiría un grado de detalle adicional que desbordaría el alcance de una primera aproximación de planificación a escala nacional.

En conjunto, el trabajo debe entenderse como una herramienta de análisis para explorar qué red mínima de hidrolineras sería necesaria para cumplir AFIR en España bajo una base de demanda asociada al transporte pesado de mercancías y bajo un conjunto de hipótesis simplificadoras explícitas. Su principal valor reside en ofrecer una aproximación estructurada al problema, útil para ordenar el debate sobre cobertura, utilización y coste de la infraestructura, más que en anticipar con precisión absoluta cómo será el despliegue real en cada ubicación concreta.

1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento se organiza siguiendo la misma secuencia lógica del problema planteado. Tras esta introducción, el capítulo 2 presenta el marco normativo y regulatorio en el que se sitúa el trabajo, con especial atención al Reglamento AFIR, a la configuración de la red TEN-T en España y a las implicaciones que ambos elementos tienen para la planificación de infraestructura de hidrógeno.

A continuación, el capítulo 3 recoge la revisión de la literatura relevante. En él se revisan, por un lado, los principales enfoques de localización de infraestructuras y, por otro, los trabajos centrados en planificación de hidrolíneas y en evaluación económica de este tipo de instalaciones. Esta revisión permite situar el problema dentro de un marco académico más amplio y precisar con mayor claridad la aportación concreta del estudio.

El capítulo 4 se dedica a los datos y a las fuentes de información empleadas en el análisis. En este punto se describen la red viaria utilizada, la información de demanda basada en transporte pesado de mercancías, los nodos urbanos y puntos de control considerados, así como los principales parámetros económicos y tecnológicos que intervienen en el trabajo.

El núcleo metodológico se desarrolla en el capítulo 5. En él se expone el proceso de preparación de la red, la generación de localizaciones candidatas, la formulación del modelo de optimización, la comprobación posterior del cumplimiento de AFIR y la construcción de la capa de análisis económico asociada a la solución obtenida. Sobre esa base, el capítulo 6 presenta los resultados del trabajo. En primer lugar, se muestra el conjunto de candidatos generado y la solución del modelo; después, se examina el grado de cumplimiento de las restricciones de cobertura y, finalmente, se analizan las implicaciones económicas y la sensibilidad de los resultados ante cambios en los parámetros principales.

El capítulo 7 se dedica a la discusión de los resultados, poniendo el foco tanto en su interpretación como en su relación con la literatura existente y en sus implicaciones para la planificación de infraestructura de hidrógeno en España. El documento se cierra con el capítulo 8, donde se recogen las principales conclusiones y algunas posibles líneas de trabajo futuro.

Por último, se incluye la bibliografía utilizada y un conjunto de anexos con material complementario donde se recogen parámetros del modelo, código fuente y resultados detallados que amplían la información del cuerpo principal.

Capítulo 2. MARCO NORMATIVO Y REGULATORIO

2.1 EL REGLAMENTO AFIR

El Reglamento (UE) 2023/1804, conocido como AFIR (*Alternative Fuels Infrastructure Regulation*), constituye el principal marco normativo europeo para el despliegue de infraestructuras de combustibles alternativos en el transporte. Su aprobación responde a una constatación bastante clara: el desarrollo de estas infraestructuras en la Unión Europea había sido desigual, fragmentado y, en muchos casos, insuficiente para acompañar la transición hacia tecnologías de bajas emisiones. Frente a esa situación, AFIR establece un marco común con requisitos mínimos obligatorios para los Estados miembros, con el objetivo de reducir la dependencia del petróleo y favorecer la descarbonización del transporte.

Uno de los aspectos más relevantes del reglamento es precisamente su naturaleza jurídica. AFIR sustituye a la anterior Directiva 2014/94/UE y adopta la forma de reglamento, lo que implica que sus disposiciones son vinculantes y directamente aplicables en todos los Estados miembros. Este cambio no es menor. En la práctica, supone pasar de un sistema más abierto, basado en marcos nacionales con niveles de ambición desiguales, a un esquema en el que los objetivos mínimos y las especificaciones técnicas son comunes para todos los países, pero donde cada Estado miembro conserva un margen amplio para definir, a través de sus marcos de acción nacionales y de sus instrumentos de política, cómo alcanzar esos objetivos y cómo movilizar la inversión privada necesaria para desplegar la infraestructura.

En otras palabras, AFIR homogeniza el destino (las metas de cobertura y las características básicas de la infraestructura), pero no uniformiza los caminos, que siguen dependiendo de las estrategias nacionales y de las decisiones de los agentes privados.

Además, el reglamento no se limita al hidrógeno. Su alcance abarca distintas infraestructuras de combustibles alternativos para el transporte por carretera, marítimo, fluvial y aéreo, incluyendo principalmente electricidad, hidrógeno y metano licuado. Sin embargo, dentro del presente trabajo interesa sobre todo la parte relativa al repostaje de hidrógeno para transporte por carretera, ya que es ahí donde AFIR introduce las obligaciones que estructuran el problema de localización analizado. En

este punto, el reglamento parte de una idea sencilla, pero con implicaciones profundas: sin una red mínima de repostaje, la adopción de vehículos impulsados por hidrógeno no puede producirse a escala significativa. El propio texto reconoce que la escasez de estaciones, y en particular la falta de infraestructura apta para vehículos pesados, impide actualmente la circulación fluida de este tipo de vehículos por el territorio de la Unión (Clean Hydrogen Observatory, 2025). A partir de ese diagnóstico, AFIR fija objetivos de despliegue obligatorios para garantizar una red suficientemente densa en la red básica TEN-T y permitir así un uso más continuo de la movilidad basada en hidrógeno.

Para el transporte por carretera, el núcleo de las exigencias se encuentra en los artículos dedicados a la infraestructura de hidrógeno. De acuerdo con el reglamento, antes del 31 de diciembre de 2030 debe existir al menos una estación de repostaje de hidrógeno de acceso público cada 200 km a lo largo de la red básica TEN-T, así como al menos una estación en cada nodo urbano.

Además, las estaciones situadas a lo largo de la red deben diseñarse para una capacidad diaria acumulada de una tonelada de hidrógeno y disponer, como mínimo, de un surtidor a 700 bar². En determinados casos, el reglamento contempla la posibilidad de reducir esa capacidad diaria a la mitad en carreteras con tráfico medio diario de vehículos pesados inferior a 2.000 unidades, siempre que existan razones socioeconómicas que lo justifiquen.

Más allá de los valores concretos, lo importante es lo que esos requisitos significan desde el punto de vista de la planificación. AFIR no pide simplemente que exista un cierto número de estaciones en cada país. Lo que exige es cobertura sobre una red concreta, con distancias máximas entre puntos de repostaje y con presencia obligatoria en nodos urbanos determinados. Eso obliga a abandonar una lógica puramente agregada o nacional y a trabajar sobre la geometría efectiva de la red viaria. En otras palabras, el cumplimiento del reglamento no puede evaluarse correctamente solo con cifras totales de estaciones; requiere comprobar dónde están situadas y qué continuidad territorial garantizan.

También resulta relevante la definición de estación de acceso público. AFIR considera de acceso público aquellos puntos de repostaje que pueden ser utilizados por cualquier usuario, incluso cuando estén situados en propiedades privadas con acceso abierto, como aparcamientos o instalaciones de

² En las aplicaciones de transporte por carretera se utilizan principalmente dos niveles de presión: 350 bar, habitual en muchos vehículos pesados, y 700 bar, típico de los vehículos ligeros y de algunos camiones de nueva generación, de modo que las estaciones duales pueden atender ambos segmentos.

uso general. Por el contrario, las infraestructuras restringidas a un grupo cerrado de usuarios, como flotas internas o aparcamientos de acceso exclusivamente privado, no se consideran válidas a estos efectos.

Esta precisión tiene consecuencias prácticas para la planificación, ya que la red exigida por el reglamento debe concebirse como una infraestructura utilizable de forma general y no como un conjunto de instalaciones privadas dispersas.

Otro elemento importante es que AFIR no se limita a fijar objetivos físicos de despliegue, sino que incorpora también exigencias relativas a la experiencia de uso y a la interoperabilidad. El reglamento establece que los usuarios deben poder repostar de manera puntual y pagar con instrumentos de pago de uso generalizado, sin necesidad de suscripción previa, y exige además transparencia en la información sobre precios. En el caso del hidrógeno, esta dimensión es relevante porque refuerza la idea de que no basta con que la estación exista: debe formar parte de una red accesible, utilizable y comprensible para el usuario final.

Desde la perspectiva de este trabajo, AFIR cumple por tanto una doble función. Por un lado, proporciona la restricción normativa que da sentido al problema de localización, al fijar requisitos espaciales concretos y verificables. Por otro, condiciona la interpretación económica de la red resultante, ya que la obligación de cobertura puede llevar a implantar estaciones en ubicaciones con una utilización inicial reducida, pero necesarias para asegurar la continuidad territorial exigida por la norma. De ahí que AFIR no deba entenderse solo como el contexto jurídico del estudio, sino como el elemento que define la propia lógica del problema analizado.

Desde una perspectiva crítica, estos requisitos técnicos plantean un desafío de coherencia operativa. Exigir una capacidad mínima de una tonelada diaria en todos los puntos de la red básica TEN-T asume un despliegue de flota que podría no estar alineado con el horizonte temporal de 2030 en todas las regiones. En tramos con menos de 2.000 vehículos pesados diarios, aunque el reglamento permite reducciones, el estándar general sigue priorizando la simetría de la red sobre la realidad del mercado. Esto sugiere que AFIR busca forzar la oferta de manera estática, corriendo el riesgo de crear “estaciones fantasma” con utilizaciones mínimas cuyo coste financiero podría comprometer la sostenibilidad global del sistema.

2.2 LA RED TEN-T EN ESPAÑA

La Red Transeuropea de Transporte (TEN-T) constituye el principal marco de planificación de las infraestructuras de transporte en la Unión Europea. Su función no se limita a identificar corredores relevantes desde un punto de vista técnico o cartográfico, sino que consiste en articular un espacio de conectividad común sobre el que se apoyan los flujos estratégicos de viajeros y mercancías, así como buena parte de las políticas europeas de movilidad, cohesión territorial y descarbonización.

En el ámbito del presente trabajo, esta red es especialmente importante porque define el espacio físico y normativo sobre el que se proyectan las obligaciones de despliegue de infraestructura de hidrógeno.

Tradicionalmente, la TEN-T se ha estructurado en dos grandes niveles: la red básica, integrada por los tramos y nodos de mayor relevancia estratégica para la conectividad europea, y la red global, que amplía esa cobertura al conjunto de infraestructuras consideradas de interés transeuropeo. La actualización introducida por el Reglamento (UE) 2024/1679 añade una arquitectura más escalonada, incorporando la red básica ampliada y reforzando la lógica temporal de desarrollo de la red con horizontes diferenciados para 2030, 2040 y 2050.

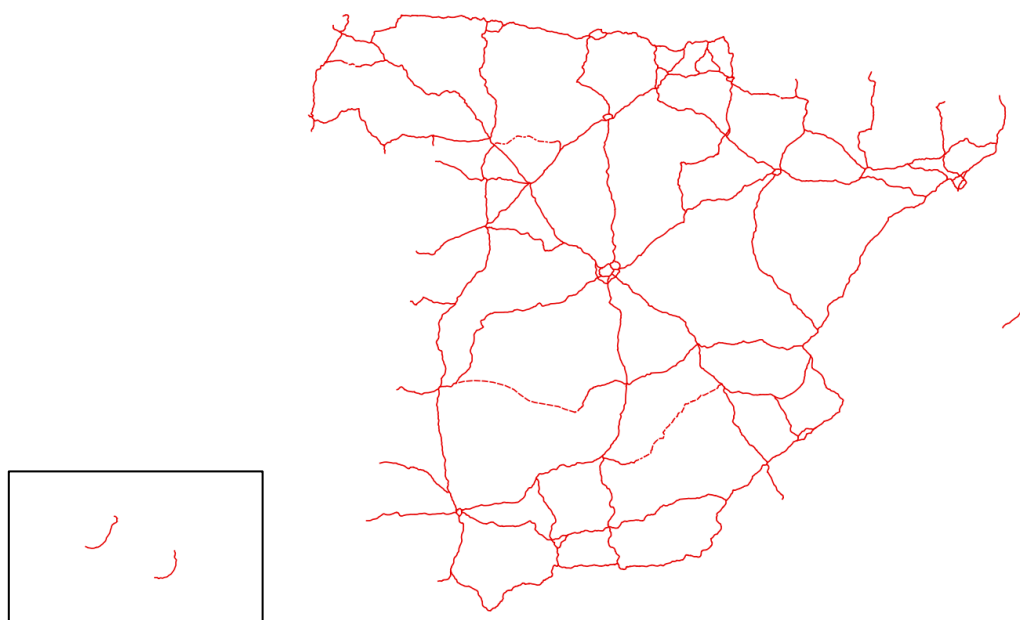


Ilustración 1: Detalle de las carreteras de la red TEN-T en España

Aunque esta evolución normativa tiene implicaciones relevantes para la política de infraestructuras, en este trabajo interesa sobre todo la red viaria TEN-T española como soporte del análisis de localización.

En España, la red TEN-T por carretera desempeña un papel particularmente relevante por la propia posición geográfica del país y por la estructura de su sistema logístico. La Península Ibérica presenta una combinación singular de grandes ejes radiales, corredores costeros, conexiones portuarias de primer orden y enlaces transfronterizos concentrados en unos pocos pasos estratégicos, especialmente en la frontera francesa. Como resultado, la red española no solo canaliza flujos internos de larga distancia, sino también una parte significativa de los intercambios terrestres entre la península y el resto del mercado europeo.

Desde la perspectiva del transporte pesado, esta red concentra los itinerarios más relevantes para la circulación de mercancías. Corredores como el mediterráneo, el atlántico o los grandes ejes que conectan Madrid con el noreste, el Levante y Andalucía vertebran buena parte del tráfico de largo recorrido y enlazan áreas metropolitanas, plataformas logísticas, puertos y zonas industriales de alta actividad.

Esto significa que la TEN-T no es simplemente una malla viaria de referencia institucional, sino una estructura que organiza la movilidad efectiva del transporte profesional por carretera en España.

Ahora bien, esa estructura no es homogénea. Existen corredores con intensidades de tráfico elevadas y una sucesión relativamente densa de nodos urbanos y logísticos, pero también tramos más largos, menos densos y territorialmente más discontinuos, donde la demanda potencial de repostaje previsiblemente será menor. Esta heterogeneidad es importante porque condiciona la planificación de hidrolineras: en algunos ejes, la combinación entre tráfico elevado y proximidad entre nodos facilita soluciones más evidentes; en otros, la continuidad espacial exigida por la regulación obliga a considerar emplazamientos menos atractivos desde un punto de vista estrictamente económico.

A esta diversidad funcional se suma la propia configuración geográfica del territorio español. La existencia de sistemas montañosos, pasos naturales limitados y corredores que concentran buena parte de la conectividad interregional hace que la distancia relevante para el análisis no sea la distancia geométrica entre dos puntos, sino la distancia realmente recorrida sobre red. En un estudio de localización como este, esa diferencia es decisiva: dos emplazamientos pueden aparecer próximos en

línea recta y, sin embargo, quedar separados por una distancia operativa sensiblemente mayor cuando se considera el trazado real de la infraestructura viaria.

Los nodos urbanos TEN-T refuerzan todavía más esta lógica de red jerarquizada. Estos nodos no solo concentran población y actividad económica, sino que actúan como puntos de articulación entre transporte de larga distancia, distribución regional e intermodalidad.

En el caso español, su distribución dibuja una geografía policéntrica en la que conviven grandes áreas metropolitanas, como Madrid o Barcelona, con nodos portuarios e industriales de primer orden, como Valencia, Bilbao o Algeciras, todos ellos con capacidad para generar o atraer una demanda significativa de hidrógeno en el transporte pesado.

Por tanto, la red TEN-T en España debe entenderse como una estructura territorial jerarquizada y funcionalmente desigual, pero esencial para la movilidad de mercancías a escala nacional y europea. Precisamente por eso constituye el marco adecuado para analizar el despliegue de infraestructura de hidrógeno bajo criterios regulatorios. Antes de abordar la estrategia nacional y las implicaciones concretas para la planificación, resulta necesario reconocer que el problema no se plantea sobre un territorio abstracto, sino sobre una red real, con corredores, nodos y restricciones espaciales que condicionan de manera directa cualquier solución factible.

2.3 ESTRATEGIA NACIONAL DE HIDRÓGENO

La estrategia española en materia de hidrógeno renovable constituye el principal marco nacional de referencia para interpretar el papel que esta tecnología puede desempeñar en la transición energética.

Su punto de partida institucional se sitúa en la Hoja de Ruta del Hidrógeno Renovable, aprobada en 2020, donde el Gobierno define una visión de desarrollo para 2030 alineada con los objetivos europeos de descarbonización y con la idea de convertir el hidrógeno en un vector relevante para la industria, el sistema energético y determinados segmentos del transporte (MITERD, 2020). Esta estrategia no sustituye a las obligaciones derivadas de la normativa europea, pero sí establece el contexto político y programático dentro del cual debe entenderse el despliegue nacional de infraestructuras.

Uno de los rasgos más importantes de esta hoja de ruta es su carácter transversal. El hidrógeno renovable no se plantea únicamente como combustible para la movilidad, sino como una pieza de

articulación entre política industrial, integración de energías renovables, innovación tecnológica y seguridad de suministro. Esa amplitud de enfoque es relevante porque sitúa el transporte dentro de una estrategia más amplia, donde la construcción de demanda y la creación de capacidades productivas avanzan de forma simultánea.

En términos cuantitativos, la estrategia española fijó metas concretas para 2030 que sirven como señal de orientación para el mercado. Entre ellas destaca el objetivo de alcanzar 4 GW de potencia instalada de electrólisis y de avanzar en la penetración del hidrógeno renovable en sectores donde la electrificación directa presenta mayores dificultades.

En el ámbito de la movilidad, la Hoja de Ruta del Hidrógeno fija para 2030 una flota mínima de al menos 150 autobuses y 5.000 vehículos ligeros y pesados propulsados por hidrógeno renovable, 2 líneas de trenes comerciales en trazados no electrificados y una red con un mínimo de 100 hidrolíneas de acceso público distribuidas por el territorio nacional (MITERD, 2020).

Estos objetivos se enmarcan en un contexto internacional en el que el número de estaciones de repostaje de hidrógeno ha superado ya las 1.000 a nivel global, con una expansión acelerada en Europa según la *Global Hydrogen Review 2023* (IEA, 2023).

Este punto es especialmente importante para el presente trabajo. Aunque la estrategia española no formula el problema con el mismo grado de precisión espacial que AFIR, sí transmite una orientación clara: el despliegue de infraestructura de repostaje debe priorizar los corredores principales, los nodos logísticos y los entornos donde pueda emerger una demanda temprana. En otras palabras, la política nacional no solo asume que habrá que construir infraestructura, sino que sugiere también una geografía prioritaria de implantación, estrechamente relacionada con la red TEN-T y con los principales ejes del transporte de mercancías (MITERD, 2020).

Además, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) y la trasposición de la Directiva RED III refuerzan esta orientación al fijar objetivos crecientes de uso de combustibles renovables en el transporte, incluyendo cuotas específicas para los combustibles renovables de origen no biológico (RFNBO), que deberán alcanzar una parte de la energía suministrada al transporte dentro de un objetivo conjunto del 5,5% de combustibles avanzados y RFNBO en 2030, del cual al menos un punto porcentual corresponderá a RFNBO. (Gobierno de España, 2020; Parlamento Europeo y Consejo, 2023; IEA-AMF, 2023).

Junto a la definición de objetivos, la estrategia española ha ido acompañada de instrumentos de apoyo económico orientados a activar la cadena de valor del hidrógeno renovable. El Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia incorporó esta prioridad a través de su Componente 9, dedicado a la hoja de ruta del hidrógeno renovable y a su integración sectorial, mientras que el IDAE ha canalizado programas de ayuda dirigidos tanto a proyectos pioneros como a iniciativas de desarrollo de la cadena de valor (Gobierno de España, 2021; IDAE, 2022). Estos mecanismos no eliminan la incertidumbre económica del despliegue, pero sí reducen parte de las barreras iniciales de inversión.

Desde una perspectiva de planificación, la estrategia nacional introduce además un elemento de legitimación política del esfuerzo inversor. Allí donde la demanda todavía es incipiente, la existencia de una política pública explícita contribuye a justificar decisiones de despliegue que difícilmente se adoptarían en un entorno estrictamente de mercado. Esto resulta particularmente relevante en el caso de las hidrolineras para transporte pesado, ya que la infraestructura debe anticiparse parcialmente a la consolidación efectiva de la flota si se quiere evitar el bloqueo característico de las tecnologías emergentes.

Con todo, la estrategia española no debe interpretarse como un plan cerrado de localización ni como un sustituto del análisis espacial detallado. Su función es distinta. Proporciona dirección, objetivos y respaldo institucional, pero deja abierta la cuestión de dónde debe situarse exactamente la infraestructura y bajo qué criterios debe priorizarse su implantación. Precisamente ahí es donde este trabajo encuentra su espacio: no en definir la conveniencia general del hidrógeno, ya asumida por la estrategia, sino en traducir ese marco político y normativo a un problema concreto de planificación sobre la red viaria española.

2.4 IMPLICACIONES PARA LA PLANIFICACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS

La combinación entre AFIR, la estructura de la red TEN-T y la estrategia española del hidrógeno convierte la planificación de hidrolineras en un problema claramente condicionado por criterios regulatorios y territoriales. No se trata únicamente de localizar estaciones allí donde la demanda esperada sea más elevada, sino de garantizar una red mínima continua que cumpla requisitos concretos de cobertura sobre corredores y nodos urbanos. En consecuencia, la lógica de despliegue no puede entenderse solo en términos de rentabilidad inmediata, sino también como una obligación de servicio asociada a la conectividad de la red.

Esto tiene una consecuencia directa sobre la forma de abordar el problema. La planificación debe basarse en distancias efectivas sobre red, en la identificación precisa de nodos obligatorios y en la consideración de tramos donde la demanda inicial puede ser reducida, pero donde la infraestructura resulta igualmente necesaria para asegurar continuidad territorial. Dicho de otro modo, la red mínima compatible con AFIR no coincide necesariamente con la red que emergería de un proceso espontáneo de inversión privada, ni con la que resultaría de una inversión pública diseñada como un despliegue único y centralizado, sino que se sitúa en un punto intermedio definido por los requisitos de cobertura y continuidad territorial.

Al mismo tiempo, la estrategia nacional del hidrógeno y los instrumentos de apoyo asociados al PRTR introducen un marco institucional que puede facilitar ese despliegue anticipado. Aunque no resuelven por sí solos la tensión entre cobertura y viabilidad económica, sí contribuyen a hacer posible una red inicial en fases en las que la demanda todavía no justifica todas las inversiones desde una lógica estrictamente comercial. Esta tensión entre mandato regulatorio, estructura territorial y viabilidad económica es, precisamente, la que justifica el enfoque metodológico adoptado en este trabajo.

Capítulo 3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

3.1 *MODELOS DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES*

Los modelos de localización de instalaciones constituyen una de las líneas clásicas de la investigación operativa y del análisis espacial aplicado. Su propósito general es determinar la ubicación más conveniente de un conjunto de instalaciones sobre un territorio o una red, de manera que se optimice algún criterio de desempeño, como la minimización de costes, la reducción de distancias, la mejora de la accesibilidad o la maximización de la cobertura de la demanda.

Como señala Snyder (2011), se trata de uno de los campos más antiguos y consolidados de la optimización aplicada, precisamente porque formaliza decisiones estratégicas con fuertes implicaciones territoriales y económicas.

Una parte esencial del desarrollo temprano de esta literatura se produjo en el contexto de los problemas de localización sobre redes discretas. En este marco, el trabajo de Hakimi (1964) resulta fundacional, al demostrar que, para determinadas formulaciones, las soluciones óptimas pueden buscarse en los nodos del grafo sin necesidad de considerar todos los puntos posibles del espacio continuo. Esta propiedad, habitualmente conocida como propiedad nodal, tuvo una relevancia metodológica decisiva, ya que permitió transformar problemas espaciales complejos en problemas discretos tratables mediante herramientas de optimización matemática.

A partir de esta base se consolidaron varias formulaciones clásicas. Entre las más conocidas se encuentran los modelos de p-mediana y p-centro, ambos orientados a localizar un número prefijado de instalaciones, aunque con funciones objetivo distintas. Mientras el problema de la p-mediana minimiza la distancia total o media entre la demanda y las instalaciones asignadas, el problema del p-centro busca minimizar la peor distancia de acceso, incorporando una lógica más cercana a la equidad espacial y a la garantía de servicio en el caso más desfavorable (Hakimi, 1964; Snyder, 2011). Junto a estas formulaciones surgió otra familia de modelos particularmente influyente: los modelos de cobertura. En ellos, el interés principal no está tanto en asignar cada punto de demanda a una instalación concreta, sino en garantizar que quede situado dentro de un umbral de servicio aceptable. El trabajo de Church y ReVelle (1974) introdujo el *Maximal Covering Location Problem* (MCLP),

que busca localizar un número limitado de instalaciones maximizando la demanda cubierta dentro de una distancia determinada. Esta formulación se convirtió en una referencia central para problemas donde los recursos son escasos y la cobertura completa no puede darse por supuesta.

La evolución posterior de esta línea ha mostrado que el MCLP no debe entenderse solo como un modelo clásico, sino como una familia metodológica extensa y diversa. Murray (2016) destaca precisamente que su relevancia se ha mantenido por la gran cantidad de extensiones y aplicaciones desarrolladas en ámbitos como emergencias, servicios públicos, logística e infraestructuras territoriales. Esta continuidad es importante porque confirma que los modelos de cobertura siguen siendo especialmente útiles cuando el problema de planificación está dominado por restricciones espaciales explícitas.

Una variante estrechamente vinculada es el *Set Covering Location Problem* (SCLP), cuya lógica invierte la pregunta del MCLP. En lugar de maximizar la cobertura con un número dado de instalaciones, el SCLP busca determinar el número mínimo de instalaciones necesario para cubrir completamente toda la demanda dentro del umbral establecido.

Esta distinción no es menor. Mientras el MCLP responde a una lógica de priorización bajo escasez, el SCLP resulta más adecuado para contextos donde existe una obligación de cobertura universal o cuasi universal, lo que lo hace especialmente pertinente en entornos regulados o en servicios considerados esenciales (Church & ReVelle, 1974; Snyder, 2011).

Con el paso del tiempo, la literatura fue ampliando estos modelos básicos para aproximarlos mejor a los problemas reales de decisión. Owen y Daskin (1998) muestran que la localización de instalaciones debe entenderse como una decisión estratégicamente compleja, en la que intervienen no solo distancias y costes, sino también incertidumbre, evolución temporal, economías de escala y relaciones con otras decisiones logísticas. Desde esta perspectiva, la teoría de localización dejó de ser un conjunto de modelos estáticos relativamente cerrados y pasó a integrarse en problemas más amplios de diseño de redes y planificación territorial.

Esa ampliación también se observa en la incorporación explícita de la incertidumbre. Snyder (2006) revisa cómo una parte creciente de la literatura ha tratado de capturar la variabilidad futura de la demanda, los costes o las condiciones operativas mediante enfoques estocásticos y robustos. Esta línea resulta especialmente relevante en decisiones de infraestructura, ya que las instalaciones suelen

tener horizontes de vida largos y deben diseñarse en contextos donde una parte de la información clave todavía no está plenamente determinada en el momento de la inversión.

En el ámbito del transporte, estas extensiones condujeron a modelos adaptados a la lógica de los flujos en red. Frente a los esquemas clásicos, centrados en puntos de demanda relativamente estáticos, comenzaron a desarrollarse formulaciones capaces de representar movimientos entre pares origen–destino y necesidades de servicio a lo largo de trayectorias completas. En este contexto destaca el *Flow-Refueling Location Model* (FRLM) de Kuby y Lim (2005), que replantea la localización de estaciones de repostaje de combustibles alternativos en función de su capacidad para hacer viables desplazamientos sobre una red, y no únicamente por su cercanía a puntos fijos de demanda.

Este desplazamiento desde la demanda puntual hacia los flujos de movilidad es especialmente importante para los combustibles alternativos y, en particular, para la infraestructura asociada al transporte de larga distancia.

La necesidad de garantizar continuidad operativa a lo largo de corredores hace que la localización de estaciones no pueda resolverse adecuadamente con modelos puramente estáticos. Por ello, los enfoques inspirados en cobertura sobre red y en captación de flujos ofrecen una base conceptual más adecuada para estudiar infraestructuras de repostaje en redes viarias extensas (Kuby & Lim, 2005; Snyder, 2011).

Desde esta perspectiva, el presente trabajo se sitúa dentro de una tradición bien establecida, pero aplicada a un problema con rasgos específicos. La localización de hidrolineras en la red TEN-T española no responde únicamente a criterios de eficiencia espacial en sentido clásico, sino a una combinación de cobertura territorial, continuidad de corredor y cumplimiento normativo. Por ello, el marco conceptual más adecuado no es un único modelo estándar, sino una articulación entre la tradición de los modelos de cobertura, la lógica de localización sobre red y los enfoques posteriores orientados al servicio de flujos de transporte.

3.2 INFRAESTRUCTURA DE HIDRÓGENO

La literatura sobre planificación de infraestructuras de hidrógeno para el transporte ha crecido de forma muy notable en las dos últimas décadas, en paralelo al renovado interés por el hidrógeno como vector de descarbonización. Este desarrollo no ha sido únicamente tecnológico, sino también metodológico: a medida que la posibilidad de desplegar flotas de vehículos de pila de combustible se volvió más realista, aumentó la necesidad de diseñar redes de repostaje capaces de sostener su operación en condiciones de incertidumbre, demanda incipiente y altos costes de inversión.

En consecuencia, la localización de hidrolineras ha pasado a ser un problema central dentro de la literatura sobre movilidad basada en hidrógeno.

Una primera característica de esta literatura es su fuerte dependencia de los modelos de localización sobre red revisados en el apartado anterior. Buena parte de los trabajos iniciales trasladaron al caso del hidrógeno herramientas ya existentes en la localización de instalaciones y en la planificación de combustibles alternativos, adaptándolas a un contexto en el que la autonomía de los vehículos, la necesidad de repostaje rápido y la cobertura de trayectos completos resultan determinantes. En este sentido, el *Flow-Refueling Location Model* propuesto por Kuby y Lim (2005) se convirtió en una referencia conceptual especialmente influyente para la literatura posterior sobre estaciones de hidrógeno.

A partir de ahí, la investigación avanzó en varias direcciones vinculadas a las familias de modelos descritas. Una de ellas formuló problemas de localización orientados a maximizar la cobertura potencial de demanda bajo restricciones presupuestarias o de número de estaciones; otra se centró en garantizar la viabilidad de trayectos de largo recorrido mediante estaciones situadas a lo largo de corredores; y una tercera, cada vez más relevante, integró decisiones conjuntas de localización, capacidad y modalidad de suministro dentro de modelos de cadena de valor del hidrógeno.

La revisión de estrategias de optimización publicada por Saha et al. (2023) en *Energies* muestra precisamente esta diversidad metodológica y confirma que la literatura ya no se limita a problemas simples de cobertura estática.

Dentro de este campo, uno de los temas más recurrentes ha sido la tensión entre despliegue temprano y eficiencia económica. Las estaciones de hidrógeno requieren inversiones elevadas y, en fases iniciales, suelen operar muy por debajo de su capacidad potencial debido al reducido tamaño de la

flota. Por ello, numerosos estudios plantean la planificación de infraestructuras no como un problema de equilibrio inmediato, sino como una decisión anticipatoria que debe facilitar la adopción futura de vehículos. Esta lógica aparece con claridad en proyectos europeos de demostración y despliegue, donde la infraestructura se concibe como condición habilitadora del mercado más que como simple respuesta a una demanda ya consolidada.

El contexto europeo ha sido especialmente relevante para esta evolución. Iniciativas como *Hydrogen Mobility Europe* (H2ME), coordinadas con apoyo de la *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking*, han proporcionado evidencia práctica sobre despliegue, operación y aprendizaje institucional en torno a estaciones de repostaje para vehículos de hidrógeno. Aunque estos proyectos no siempre adoptan una formulación estrictamente académica de optimización, sí ofrecen una referencia empírica muy valiosa sobre cómo se estructura una red emergente, qué problemas operativos aparecen en la práctica y por qué los corredores y flotas cautivas han tenido un papel tan importante en las fases iniciales de desarrollo.

Junto a estos proyectos, varios informes estratégicos europeos han contribuido a consolidar una visión más amplia del papel del hidrógeno en la transición energética. En particular, el *Hydrogen Roadmap Europe* elaborado por *Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking* destaca que el despliegue del hidrógeno requiere una combinación de producción, infraestructura y demanda final que avance de forma coordinada, lo que tiene implicaciones directas para la planificación de estaciones de repostaje (*Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking*, 2019). En el ámbito del transporte, esta lectura refuerza la idea de que la red de hidrolineras no puede diseñarse únicamente desde criterios locales de rentabilidad, sino como parte de una arquitectura territorial y energética más amplia.

Otra línea importante de la literatura reciente ha consistido en integrar la decisión de localización con la elección del modo de suministro del hidrógeno.

Algunos trabajos comparan estaciones con producción on-site mediante electrólisis frente a estaciones abastecidas desde producción centralizada y distribución por carretera o tubería. Esta ampliación es relevante porque modifica la función objetivo del problema: la cuestión deja de ser solo dónde ubicar la estación, y pasa a incluir también cómo abastecerla al menor coste posible o con la menor huella operativa.

También se observa una evolución en la escala espacial de los estudios. Muchos trabajos tempranos se centraron en áreas urbanas o regionales relativamente compactas, donde la lógica dominante era

servir una demanda concentrada y relativamente previsible. Sin embargo, la atención se ha desplazado progresivamente hacia corredores interurbanos y transporte pesado, precisamente porque son los ámbitos donde el hidrógeno parece ofrecer una propuesta de valor más clara frente a otras tecnologías, como ponen de manifiesto los estudios de viabilidad tecno-económica de estaciones de hidrógeno integradas en sistemas de transporte regional (por ejemplo, Okonkwo, 2024).

Los informes de buenas prácticas para estaciones pesadas desarrollados en el entorno del proyecto H2Haul reflejan bien este cambio, al poner el foco en requisitos operativos, tamaño de estación, fiabilidad y diseño de infraestructura para vehículos de largo recorrido.

A pesar de estos avances, la literatura sigue mostrando varias limitaciones.

En primer lugar, muchos estudios optimizan redes bajo escenarios de demanda hipotética o con información agregada, lo que dificulta trasladar sus resultados a obligaciones regulatorias espacialmente precisas. En segundo lugar, no todos trabajan con distancias efectivas sobre red ni con una representación detallada de los corredores, de modo que algunas soluciones pueden ser razonables como aproximación estratégica pero insuficientes para verificar cumplimiento normativo estricto. En tercer lugar, todavía es relativamente escasa la literatura que combine en una misma arquitectura metodológica la localización espacial, la lógica regulatoria de cobertura y la evaluación económica de estaciones individualizadas.

Precisamente por eso, el interés del presente trabajo se sitúa en un punto intermedio entre varias líneas de investigación. Por un lado, recoge la herencia de los modelos de localización y repostaje en red aplicados a combustibles alternativos. Por otro, incorpora la necesidad de representar corredores reales, nodos obligatorios y restricciones explícitas derivadas del marco regulatorio europeo. Y, además, enlaza esa solución espacial con una lectura económica de la infraestructura seleccionada.

En este sentido, el trabajo no parte de cero dentro de la literatura sobre hidrógeno, pero sí se inserta en un espacio donde todavía existen vacíos metodológicos relevantes.

3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE ESTACIONES DE HIDRÓGENO

La evaluación económica de las estaciones de hidrógeno constituye una dimensión central dentro de la literatura sobre infraestructuras de repostaje.

A diferencia de otros problemas de localización en los que la instalación puede modelizarse como un activo relativamente simple, en el caso de las hidrolineras la inversión incorpora equipos intensivos en capital, costes operativos sensibles al nivel de utilización y una fuerte dependencia del modo de producción o suministro del hidrógeno. Por ello, la literatura reciente ha tendido a abordar estas infraestructuras desde una perspectiva tecno-económica, en la que localización, escala, utilización y coste forman parte de un mismo problema analítico.

El indicador más utilizado en este contexto es el coste nivelado del hidrógeno en estación, o *Levelized Cost of Hydrogen* (LCOH). Este indicador expresa, en términos unitarios, el coste total descontado de suministrar hidrógeno en el punto en estación (hidrolinera) a lo largo de la vida útil del proyecto, y permite comparar configuraciones tecnológicas distintas bajo una métrica homogénea. Su relevancia en la literatura se debe a que integra en una sola medida los principales determinantes económicos del sistema: inversión inicial, costes de operación y mantenimiento, consumo energético, reemplazo de componentes y volumen de hidrógeno efectivamente producido o dispensado.

En términos generales, el LCOH en estación puede formularse como el cociente entre el valor presente de todos los costes del sistema y el valor presente de toda la producción acumulada de hidrógeno durante la vida útil de la instalación:

$$\text{LCOH} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{\text{CAPEX}_t + \text{OPEX}_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{M_{H_2,t}}{(1+r)^t}}$$

donde CAPEX_t representa la inversión realizada en el periodo t , OPEX_t recoge los costes de operación y mantenimiento en el año t , $M_{H_2,t}$ es la masa de hidrógeno producida o dispensada en el año t (en kg), r es la tasa de descuento y T es la vida útil del proyecto en años. Esta formulación refleja con claridad que el coste unitario del hidrógeno no depende únicamente del nivel absoluto de inversión, sino también del volumen efectivo de producción sobre el que esa inversión se amortiza.

En muchos trabajos aplicados, cuando la inversión se realiza esencialmente al inicio del proyecto y la producción anual puede considerarse relativamente estable, esta expresión se simplifica mediante el uso del factor de recuperación de capital. En ese caso, el LCOH en estación puede aproximarse como:

$$\text{LCOH} = \frac{\text{CAPEX} \cdot \text{CRF} + \text{OPEX}_{\text{fijo}}}{M_{\text{H}_2, \text{anual}}} + \text{OPEX}_{\text{variable}}$$

donde CRF es el factor de recuperación del capital (*Capital Recovery Factor*):

$$\text{CRF} = \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1}$$

donde $\text{OPEX}_{\text{fijo}}$ representa los costes fijos anuales, $M_{\text{H}_2, \text{anual}}$ es la producción anual de hidrógeno y $\text{OPEX}_{\text{variable}}$ agrupa los costes variables por kilogramo. Esta forma simplificada resulta especialmente útil en estudios comparativos, ya que permite identificar con mayor transparencia el peso relativo de la inversión, la utilización y los costes variables sobre el resultado final.

La evidencia empírica confirma que estos componentes no contribuyen de forma homogénea al LCOH. En estaciones de hidrógeno renovable para vehículos pesados, el CAPEX asociado a equipos de compresión y almacenamiento y el coste de la electricidad explican habitualmente la mayor parte del coste nivelado por kilogramo, mientras que los costes de operación y mantenimiento tienen un peso relativo menor pero creciente en instalaciones complejas. En configuraciones con producción in situ por electrólisis, el precio de la electricidad y el dimensionamiento de compresores y tanques condicionan de forma directa la competitividad económica de la estación, incluso antes de considerar el efecto del grado de utilización.

Los estudios cuantitativos ilustran bien esta estructura de costes. El informe de NREL sobre el coste nivelado del hidrógeno dispensado para vehículos pesados estima rangos de LCOH en torno a 3,8-12,6 dólares/kg en estaciones de gran tamaño a 2030, según el tamaño de la estación, la tecnología de suministro y su tasa de utilización, con un peso muy significativo del CAPEX de compresión y del coste de la electricidad en los escenarios de coste alto. De forma consistente, análisis centrados en producción renovable in situ en Europa sitúan el coste en torno a 11 €/kg para estaciones con bajos

niveles de utilización, lo que pone de manifiesto que una infraestructura sobredimensionada y poco utilizada tiende a generar LCOH muy elevados (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

Una de las conclusiones más sólidas de la literatura es que el factor de utilización de la estación constituye una de las variables más influyentes sobre el LCOH en estación (Pérez-Bravo et al., 2026). Cuando la demanda es baja, el volumen anual de hidrógeno dispensado resulta insuficiente para diluir los costes fijos del activo, por lo que el coste por kilogramo aumenta con rapidez. En cambio, a medida que crece la utilización de la capacidad instalada, el coste unitario se reduce de forma apreciable.

El informe de NREL sobre el coste nivelado del hidrógeno dispensado para vehículos pesados insiste precisamente en esta relación y muestra que el tamaño de la estación y su grado de utilización explican una parte esencial de la competitividad económica del repostaje (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

Junto a la utilización, el modo de producción o suministro del hidrógeno constituye otra variable decisiva. La literatura distingue habitualmente entre estaciones con producción *on-site* mediante electrólisis y estaciones abastecidas desde centros de producción externos, con posterior distribución por carretera o por red dedicada. Esta diferencia no es menor, porque modifica tanto la estructura de costes como la localización económicamente óptima de las instalaciones. En unas configuraciones pesa más el CAPEX local del electrolizador; en otras, adquieren mayor importancia los costes logísticos y de transporte del hidrógeno hasta la estación. En este trabajo se ha considerado abastecimiento externo para el hidrógeno necesario por cada hidrolinera, dando más peso al coste del suministro frente al de infraestructura.

En conjunto, la literatura tecno-económica permite extraer una conclusión clara: la viabilidad económica de una estación de hidrógeno no depende de un único parámetro, sino de la interacción entre escala, utilización, tecnología, costes y modalidad de suministro.

Esta idea resulta especialmente relevante para el presente trabajo, ya que una red diseñada bajo exigencias regulatorias puede incluir estaciones con demanda reducida, pero capacidad mínima obligatoria. En estos casos, el análisis económico deja de ser un complemento secundario y pasa a ser una herramienta indispensable para interpretar el coste real del cumplimiento de la red mínima exigida.

En última instancia, la literatura tecno-económica señala que para que el LCOH en estación resulte competitivo, debe traducirse en un coste por kilómetro que no penalice excesivamente la operativa del transporte. Bajo las hipótesis actuales de mercado, el hidrógeno sigue requiriendo señales de precio adicionales o apoyos públicos, ya que, frente a los costes energéticos del diésel y la electricidad, el vector hidrógeno presenta una desventaja estructural en la mayoría de los escenarios de larga distancia. Este contexto justifica el interés de este estudio por cuantificar el coste de la universalidad de una red obligatoria.

3.4 CONTRIBUCIÓN DEL ESTUDIO

La revisión precedente pone de manifiesto que la literatura sobre infraestructura de hidrógeno ha avanzado de forma significativa en tres frentes: la modelización de la localización de estaciones, la evaluación tecno-económica de su operación y el análisis estratégico de corredores y redes de movilidad. Sin embargo, estos desarrollos no siempre han evolucionado de forma integrada.

En muchos casos, los estudios de localización se centran en la cobertura espacial, los estudios económicos en el coste de producción o dispensación, y los informes sectoriales en escenarios agregados de despliegue, sin articular plenamente estas tres dimensiones en una única arquitectura analítica.

- El primer vacío relevante se refiere a la traducción operativa de los marcos regulatorios recientes. La mayor parte de la literatura académica sobre localización de hidrolineras se desarrolló antes de la entrada en vigor de AFIR o, al menos, antes de que sus exigencias concretas quedaran definidas con claridad. Como resultado, numerosos trabajos optimizan redes de estaciones desde perspectivas de eficiencia o cobertura potencial, pero no desde el cumplimiento explícito de obligaciones normativas como la separación máxima entre estaciones, la cobertura de nodos urbanos TEN-T o la capacidad mínima exigida por estación. Este vacío es especialmente importante en el contexto europeo actual, donde la planificación ya no responde solo a expectativas de mercado, sino a mandatos regulatorios vinculantes.
- El segundo vacío identificado afecta a la representación espacial del problema. Una parte relevante de la literatura trabaja con enfoques agregados, distancias simplificadas o niveles territoriales donde la precisión cartográfica no resulta decisiva. Estas aproximaciones pueden ser útiles para estimar órdenes de magnitud o comparar escenarios generales, pero son menos

adecuadas cuando el objetivo consiste en verificar si una red concreta cumple un requisito espacial preciso sobre corredores reales. En este tipo de problemas, la diferencia entre distancia euclidiana y distancia efectiva sobre red deja de ser una cuestión secundaria y pasa a ser un elemento determinante para la validez de la solución.

- El tercer vacío se relaciona con el tipo de demanda y con la escala del análisis. Buena parte de la literatura temprana sobre hidrolíneas se desarrolló en contextos urbanos o metropolitanos, donde la lógica dominante era servir una demanda relativamente concentrada y asociada a turismos o flotas cautivas. Sin embargo, el marco actual de despliegue europeo sitúa cada vez más el foco en el transporte pesado y en los corredores interurbanos, donde las necesidades operativas son distintas y la continuidad de la red adquiere un papel mucho más importante. Los proyectos europeos más recientes, como H2Haul, evidencian precisamente esta transición hacia infraestructuras de mayor capacidad y orientadas a vehículos pesados de larga distancia.
- El cuarto vacío es metodológico. Los modelos clásicos de cobertura y los enfoques inspirados en el FRLM ofrecen herramientas valiosas para estudiar la localización de estaciones, pero no siempre encajan de forma inmediata con las exigencias específicas del problema regulatorio actual. Algunas formulaciones requieren matrices origen-destino muy detalladas, mientras que otras representan la cobertura de manera demasiado abstracta para capturar adecuadamente la continuidad espacial exigida por AFIR. Esto sugiere la necesidad de formulaciones intermedias, capaces de trabajar con corredores reales, puntos de control y restricciones normativas explícitas.

Existe además un vacío importante en la integración entre localización espacial y evaluación económica. Aunque la literatura tecno-económica sobre estaciones de hidrógeno ha avanzado mucho en el análisis del LCOH en estación, de la electrólisis y de los costes en estación, no siempre enlaza esos resultados con una red espacialmente definida de instalaciones seleccionadas bajo criterios regulatorios. De forma paralela, muchos estudios de localización terminan en la identificación de emplazamientos, pero no analizan con suficiente detalle qué implicaciones económicas tiene operar esas estaciones bajo niveles de demanda heterogéneos.

Esta desconexión es especialmente problemática en redes obligatorias, donde algunas estaciones pueden resultar necesarias desde el punto de vista territorial aun siendo poco atractivas en términos estrictamente económicos.

Finalmente, persiste un vacío aplicado en el caso español. Aunque existen diagnósticos estratégicos, hojas de ruta y estudios sectoriales sobre el potencial del hidrógeno, siguen siendo escasos los trabajos que traduzcan las exigencias europeas de despliegue a una formulación explícita sobre la red TEN-T española, con representación detallada de corredores, nodos urbanos y distancias reales de red. Esto es relevante porque España presenta una combinación muy particular de grandes corredores logísticos, conectividad internacional, heterogeneidad territorial y amplias zonas de menor densidad, lo que convierte su red en un caso especialmente interesante para estudiar el coste territorial del cumplimiento regulatorio.

A partir de estos vacíos, la contribución del presente trabajo puede situarse con mayor precisión.

En primer lugar, propone una formulación de localización explícitamente alineada con AFIR, incorporando la cobertura de nodos urbanos y la continuidad espacial exigida sobre la red TEN-T. En segundo lugar, trabaja con una representación de la red viaria basada en distancias efectivas y no en aproximaciones geométricas simplificadas. En tercer lugar, adapta la lógica de los modelos de cobertura y repostaje en red a un problema regulatorio concreto, evitando tanto la abstracción excesiva como la dependencia de matrices origen-destino exhaustivas.

En cuarto lugar, el trabajo añade una capa económica que permite analizar no solo dónde debería desplegarse la infraestructura, sino también qué implicaciones tiene esa red mínima en términos de coste. Esta integración entre localización y evaluación tecno-económica resulta especialmente importante para interpretar el sobrecoste asociado a corredores de baja demanda y, en términos más amplios, para cuantificar el coste de la universalidad regulatoria.

En consecuencia, la contribución diferencial de este estudio radica en su capacidad para actuar como una prueba de estrés sobre la normativa. Al integrar el modelo MILP con el análisis de LCOH, el trabajo permite cuantificar en el caso español el impacto de las restricciones de AFIR. No se limita a proponer localizaciones, sino que evalúa el sentido económico de la cobertura homogénea, identificando qué parte del sobrecoste de la red responde a una necesidad real del transportista y qué parte se asocia al papel de garantizar la continuidad espacial, evaluando como los requisitos impactan en la eficiencia operativa inicial.

Por todo ello, la contribución del presente trabajo se sitúa en un espacio todavía insuficientemente cubierto por la literatura existente.

No pretende sustituir los estudios estratégicos de gran escala ni las evaluaciones puramente tecnológicas de una estación tipo, sino conectar ambos planos a través de una metodología reproducible aplicada a un caso nacional concreto. Desde esta perspectiva, el trabajo busca aportar una herramienta útil tanto para la discusión académica sobre planificación de infraestructuras como para la interpretación práctica del despliegue mínimo exigido por la regulación europea.

Capítulo 4. DATOS Y FUENTES DE INFORMACIÓN

4.1 RED TEN-T

El análisis de localización de hidrolíneas parte de una representación explícita de la red viaria sobre la que se van a aplicar las restricciones de cobertura. En el caso del presente trabajo, esa representación se construye a partir de la cartografía oficial de la red TEN-T por carretera en España disponible en la plataforma Hermes del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (MITMS)³.

La elección de esta fuente responde a su carácter oficial y a su alineamiento con la normativa europea sobre la Red Transeuropea de Transporte.

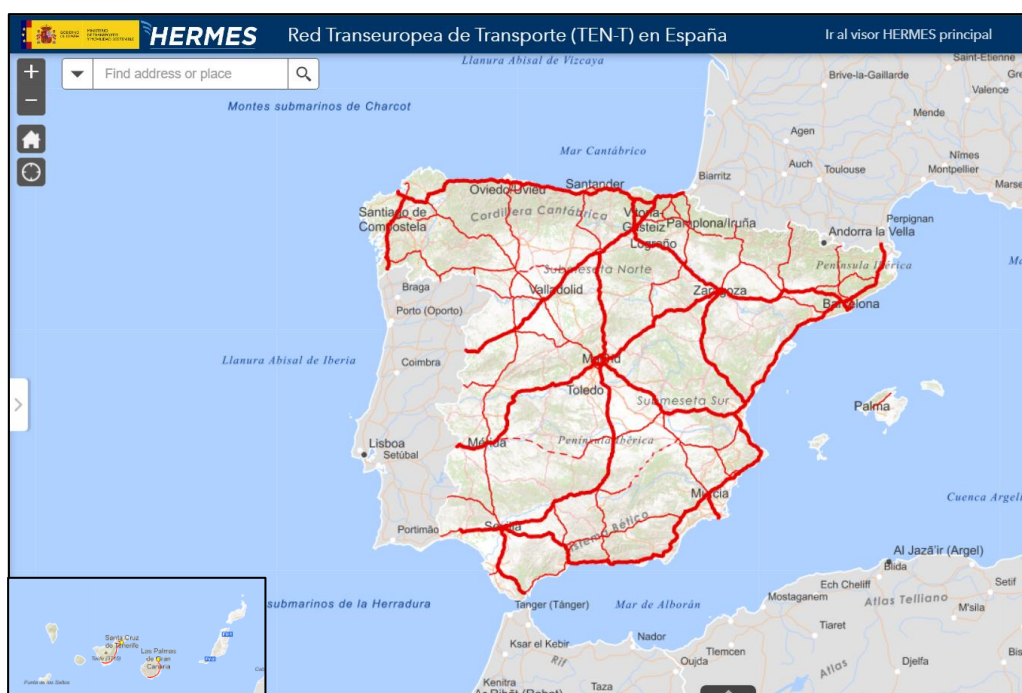


Ilustración 2: Herramienta HERMES para la visualización de la red TEN-T

La plataforma Hermes proporciona la geometría y clasificación de la red viaria estatal, incluyendo la identificación de los tramos que forman parte de la red básica y de la red global TEN-T por carretera. Esta información se integra en el Sistema Cartográfico Nacional y es coherente con los requisitos de la Directiva INSPIRE para redes de transporte, lo que garantiza una descripción homogénea y

³ <https://mapas.fomento.gob.es/VisorTENT/>

actualizada de la red de interés. A efectos del presente trabajo, se filtran los tramos para retener exclusivamente aquellos que pertenecen a la TEN-T, dado que el objeto del estudio se circunscribe explícitamente a esta red.

Sobre esta base cartográfica se construye un grafo que captura la estructura topológica de la red TEN-T española. Los nodos del grafo corresponden a intersecciones, enlaces y puntos terminales de los tramos viarios identificados en Hermes, mientras que las aristas representan los segmentos de carretera entre nodos contiguos. El peso asociado a cada arista se define como la longitud del tramo en kilómetros, calculada a partir de su geometría en un sistema de referencia adecuado para el territorio español, consistente con las prácticas habituales en cartografía oficial. Esta representación es coherente con el tratamiento de la TEN-T en el marco europeo y con otros trabajos que modelizan redes viarias mediante grafos ponderados.

Una vez construido el grafo, todas las distancias relevantes para el modelo se calculan como distancias mínimas sobre red, y no como distancias euclidianas. De este modo, las distancias entre localizaciones candidatas, nodos urbanos o puntos de control se obtienen mediante algoritmos de caminos mínimos sobre el grafo TEN-T, lo que permite aplicar las restricciones de cobertura basadas en kilómetros de corredor sobre distancias efectivamente recorridas.

Para reducir la complejidad del grafo sin perder información relevante, se agrupan secuencias de aristas colineales y se fusionan nodos de grado dos, de modo que cada arista del grafo simplificado represente un tramo homogéneo desde el punto de vista de la ruta. Este tipo de simplificación, habitual en análisis de redes, permite reducir el tamaño del grafo manteniendo invariantes las distancias de red entre puntos de interés.

La identificación de los nodos urbanos TEN-T se realiza a partir del listado oficial de nodos recogido en la normativa europea y en la documentación asociada a la red transeuropea de transporte. Cada nodo urbano se georreferencia utilizando la información disponible sobre áreas urbanas funcionales y se proyecta sobre la red viaria TEN-T.

El resultado de este proceso es una representación de la red TEN-T española en forma de grafo ponderado y simplificado, pero topológicamente completo, sobre el que pueden formularse y resolver de manera consistente las restricciones espaciales del modelo de localización. Esta representación actúa como puente entre la cartografía oficial proporcionada por Hermes y el problema de

optimización, y permite interpretar las soluciones obtenidas como configuraciones concretas sobre una red viaria real, alineadas con la definición institucional de la TEN-T.

4.2 DEMANDA DE TRANSPORTE PESADO

La estimación de la demanda de transporte pesado constituye el segundo bloque fundamental de datos del trabajo, aquí el objetivo es caracterizar la intensidad potencial de uso de esa red por parte del transporte de mercancías por carretera y traducirla, posteriormente, en una aproximación a la demanda de hidrógeno asociada.

En consecuencia, la demanda se incorpora como una capa adicional de información que permite asignar relevancia económica y operativa a los distintos corredores y emplazamientos candidatos.

Para construir esta capa se utilizan datos de flujos de mercancías por carretera basados en ETISPLUS, que constituye una de las referencias más utilizadas para representar matrices origen-destino de transporte de mercancías a escala europea. La lógica de esta base de datos no es cartográfica, sino funcional: describe volúmenes de mercancía transportada entre regiones y permitir su proyección sobre una red de carreteras mediante rutas modelizadas. Trabajos posteriores basados en ETISPLUS han mostrado su utilidad para estimar flujos de camiones, recorridos y cargas sobre secciones concretas de la red, lo que la convierte en una fuente adecuada para aproximar la intensidad del transporte pesado relevante para la planificación de infraestructuras.

ETISPLUS proporciona información sobre flujos origen-destino de mercancías expresados en toneladas. Esta información permite identificar no solo qué pares territoriales concentran mayor volumen de transporte, sino también por qué corredores tienden a canalizarse dichos flujos. Para el presente trabajo, esta característica es especialmente relevante, ya que el interés no se centra únicamente en el transporte generado o atraído por un punto concreto, sino en la presión de circulación de vehículos pesados a lo largo de la red TEN-T española y, por tanto, en la potencial necesidad de repostaje sobre ella.

Ahora bien, la información de ETISPLUS no se incorpora de manera directa al modelo como si representara una demanda observada de hidrógeno.

Entre el flujo de mercancías medido en toneladas y la demanda diaria de una hidrolinera existe una cadena de transformación que obliga a introducir varias hipótesis intermedias. En primer lugar, es

necesario pasar de toneladas transportadas o de flujos origen-destino agregados a una medida representativa del tráfico de vehículos pesados que atraviesa cada corredor. En segundo lugar, debe asumirse una determinada tasa de penetración de camiones propulsados por hidrógeno dentro del conjunto del transporte pesado. Y, finalmente, es preciso convertir ese flujo potencial de vehículos de hidrógeno en una estimación de consumo y repostaje.

Esta secuencia de conversión responde a una limitación estructural de la información disponible. Las estadísticas europeas de transporte por carretera recogen magnitudes como toneladas, toneladas-kilómetro, kilómetros recorridos o número de trayectos, pero no observan directamente una futura demanda de hidrógeno para el transporte pesado, ya que dicha demanda todavía no existe a gran escala en términos históricos.

En el presente trabajo, el procedimiento parte de los flujos de mercancías o de tráfico pesado disponibles para 2010 y los transforma en una estimación del número de vehículos pesados diarios asociados a cada tramo o emplazamiento candidato para 2030. Aunque esta aproximación no elimina la incertidumbre, permite vincular la demanda del modelo a una base empírica razonable y homogénea. Además, resulta metodológicamente coherente con otros estudios de planificación de infraestructuras para transporte pesado en Europa, que utilizan matrices ETISPLUS y rutas modelizadas para inferir necesidades futuras de recarga o repostaje sobre la red viaria.

Una vez estimado el flujo de vehículos pesados, el siguiente paso consiste en identificar qué parte de ese tráfico podría corresponder, en el horizonte de análisis, a vehículos de pila de combustible de hidrógeno. Esta operación exige adoptar un escenario de penetración tecnológica. Dado que el objetivo del trabajo no es predecir con precisión la cuota futura del hidrógeno en el transporte pesado, sino evaluar la red mínima y sus implicaciones bajo un escenario plausible, la tasa de penetración se introduce como una hipótesis de modelización y no como una predicción cerrada.

A partir de esa cuota de penetración, la demanda de hidrógeno se obtiene combinando el número estimado de vehículos, la frecuencia esperada de repostaje y el consumo medio por unidad de distancia recorrida a partir de un análisis de mercado de los principales fabricantes de vehículos pesados impulsados por hidrógeno.

La lógica subyacente es sencilla: cuanto mayor sea la intensidad de tráfico pesado, mayor será el número potencial de repostajes; y cuanto más elevada sea la presencia de vehículos de hidrógeno en ese flujo, mayor será la demanda capturable por la estación.

No obstante, conviene subrayar que esta demanda no debe interpretarse como una asignación exacta y observada a cada estación futura, sino como una estimación de referencia para el análisis. En un contexto real, la demanda efectiva dependería de numerosos factores adicionales: decisiones operativas de flota, comportamiento de los transportistas, existencia de estaciones competidoras, precios relativos del hidrógeno, disponibilidad operativa de la instalación o evolución temporal del parque de vehículos. El objetivo aquí no es capturar toda esa complejidad, sino construir una aproximación suficientemente rigurosa para comparar emplazamientos y evaluar el impacto económico de una red mínima de cumplimiento regulatorio.

En definitiva, la demanda de transporte pesado se incorpora como una capa analítica derivada de flujos de mercancías y de hipótesis de adopción tecnológica, y no como un dato directo observado de consumo de hidrógeno. Esta distinción es importante porque el modelo no pretende reproducir una demanda actual inexistente, sino construir un escenario razonado que permita evaluar cómo podría comportarse una red mínima de hidrolíneas desplegada sobre la TEN-T española.

4.3 PARÁMETROS ECONÓMICOS Y TECNOLÓGICOS

La evaluación económica desarrollada en este trabajo parte de una decisión metodológica concreta: la estación no se modeliza como una instalación con producción *on-site*, sino como una infraestructura abastecida externamente, en la que el hidrógeno llega ya producido y se entrega a la estación mediante camión cisterna.

Eso centra el foco del análisis en el coste de poner el hidrógeno a disposición del usuario final a través de una estación compuesta por sistemas de compresión, almacenamiento y dispensación.

Esta precisión es importante porque condiciona el significado del LCOH en estación calculado en el trabajo. En este caso, no se está estimando el coste nivelado de producción de hidrógeno renovable, sino el coste nivelado del hidrógeno dispensado en estación. Esa distinción aparece con claridad en los trabajos recientes de NREL sobre repostaje para vehículos pesados, donde el coste final se interpreta como el resultado conjunto del suministro del hidrógeno y de la infraestructura necesaria para acondicionarlo y entregarlo al vehículo (National Renewable Energy Laboratory, 2023; Chung, 2024).

A partir de esa hipótesis, los parámetros del modelo pueden ordenarse en torno a unos pocos bloques fundamentales.

El primero de ellos es la inversión inicial asociada a la propia estación. Como no existe electrólisis on-site, el perímetro técnico se limita a los equipos de compresión, a los sistemas de almacenamiento a presión, a los dispensadores y a los elementos auxiliares imprescindibles para la operación. Este recorte del perímetro no simplifica solo el cálculo; también mejora su coherencia con el problema estudiado, ya que permite analizar la economía de la red de repostaje sin mezclarla con la de la producción upstream del hidrógeno.

La literatura disponible ofrece una base razonable para justificar esta elección. El informe del ICCT sobre el coste del hidrógeno renovable en estaciones europeas resulta útil precisamente porque descompone el coste de la estación e identifica la contribución de los sistemas de almacenamiento, compresión y dispensación, incluso en configuraciones más amplias que sí incluyen producción local (Zhou et al., 2022). Ese tipo de desagregación permite aislar el bloque CSD y utilizarlo como referencia metodológica en escenarios como el presente, donde la estación se entiende exclusivamente como punto de acondicionamiento y suministro.

Un segundo grupo de parámetros corresponde a la operación de la instalación. Aquí conviene distinguir entre costes fijos y costes variables. Los primeros recogen gastos que persisten aunque el volumen servido sea reducido: mantenimiento, inspecciones, seguros, supervisión o reposiciones menores. Los segundos, en cambio, dependen del funcionamiento efectivo del sistema y del número de kilogramos atendidos, especialmente por el consumo energético asociado a la compresión y a la operación del dispensado.

Esta distinción aparece de forma recurrente tanto en estudios tecno-económicos como en herramientas de cálculo de LCOH en estación, y es útil porque permite explicar por qué dos estaciones técnicamente similares pueden acabar presentando costes unitarios muy distintos si operan con niveles de utilización diferentes.

Hay además un parámetro que, en este enfoque, adquiere un papel central: el coste del hidrógeno a la entrada de la estación. Al no formar parte del sistema modelizado la producción local, ese coste debe introducirse como una variable exógena. No es un detalle menor. En realidad, separarlo explícitamente del coste de la propia estación permite distinguir entre dos planos analíticos distintos: por un lado, la economía del abastecimiento mayorista de hidrógeno; por otro, la economía de la

infraestructura de repostaje que hace posible su uso en la red TEN-T. Fuentes institucionales como el *European Hydrogen Observatory* muestran, además, que los costes de producción del hidrógeno en Europa presentan una variabilidad considerable según tecnología, país y condiciones energéticas, lo que refuerza la conveniencia de tratar este componente como un input abierto y no como una constante universal.

La IEA también insiste en esa misma idea al subrayar que el coste del hidrógeno sigue dependiendo en gran medida del precio de la electricidad, de la madurez tecnológica y de la escala de los proyectos (International Energy Agency, 2019, 2023). Aunque en este trabajo no se modeliza la fase de producción, esa evidencia sigue siendo relevante porque ayuda a justificar por qué el precio del hidrógeno suministrado a la estación no puede fijarse de forma arbitraria ni desvincularse del contexto europeo más amplio.

Junto a estos bloques económicos, el modelo necesita algunos parámetros financieros y operativos. Entre los primeros se encuentran la vida útil de la infraestructura y la tasa de descuento, necesarias para anualizar la inversión y expresar el coste en términos comparables. Entre los segundos, el más importante es probablemente el grado de utilización de la estación. No porque sea el único determinante del LCOH en estación, sino porque condiciona directamente la cantidad de hidrógeno sobre la que se reparten los costes fijos. Los análisis de NREL sobre estaciones para transporte pesado muestran precisamente que el nivel de utilización es uno de los elementos que más pesan en el coste final del hidrógeno dispensado.

Este punto resulta especialmente relevante en el marco del presente trabajo. La red que se estudia no se diseña desde una lógica puramente comercial, sino desde un criterio de cobertura mínima exigida por AFIR. Eso significa que algunas estaciones pueden ser necesarias para garantizar continuidad territorial o presencia en nodos urbanos, aunque no coincidan con las ubicaciones de mayor demanda potencial. En consecuencia, el coste económico de la red no depende únicamente de la tecnología instalada, sino también del hecho de que parte de la infraestructura puede operar durante un tiempo con niveles de uso modestos.

Desde esta perspectiva, los parámetros económicos y tecnológicos no se introducen para describir toda la cadena de valor del hidrógeno, sino para construir una representación consistente del coste asociado a estaciones CSD abastecidas externamente.

Capítulo 5. METODOLOGÍA

5.1 *SECUENCIA METODOLÓGICA*

El objetivo de la metodología desarrollada en este trabajo es construir una herramienta cuantitativa que permita diseñar y evaluar redes mínimas de hidrolíneas para el transporte pesado en España, integrando en un mismo marco la geografía de la red TEN-T, la demanda de transporte y el coste nivelado del hidrógeno en estación.

Para ello se ha implementado una herramienta en Python (versión 3.11.14) organizada en varias etapas consecutivas: en primer lugar, la representación y procesamiento de la red TEN-T; en segundo lugar, la formulación y resolución del problema de localización de estaciones; en tercer lugar, la incorporación de los patrones de demanda de transporte pesado; y, por último, la evaluación económica basada en el LCOH en estación, utilizando como entrada los resultados de las etapas anteriores.

Procesamiento Red TEN-T

El proceso arranca con la construcción de un grafo viario a partir de la cartografía oficial de la TEN-T española. Sobre ese grafo se define la dimensión espacial del problema: localizaciones candidatas para las estaciones y puntos que deben quedar cubiertos para cumplir los requisitos de AFIR. A continuación, se calculan distancias mínimas sobre la red entre candidatos y puntos a cubrir, y con ellas se generan las matrices de cobertura que servirán de base al modelo de optimización.

Resolución del problema de localización

El siguiente bloque consiste en formular el problema de localización como un modelo de programación lineal entera mixta. A partir de las matrices de cobertura, el modelo selecciona el subconjunto de localizaciones que garantiza la cobertura de todos los nodos urbanos y puntos de control bajo las reglas fijadas, con una función objetivo que, en el escenario base, busca la red mínima compatible con AFIR. La resolución se realiza con un solver estándar de MILP, y los detalles de la formulación se desarrollan en los apartados posteriores.

Incorporación de la demanda para la optimización

Una vez obtenida la red de estaciones, se incorpora la demanda de transporte pesado. Para ello se utilizan flujos sintéticos derivados de ETISPLUS y actualizados con Eurostat, que asignan tráfico de camiones a los tramos de la red europea. Esa información se superpone a la solución espacial del modelo para estimar la intensidad de uso potencial de cada estación, aplicando hipótesis de penetración de vehículos de hidrógeno y de consumo energético.

Evaluación económica

Sobre esta combinación de localización y demanda se aplica finalmente el módulo económico. En coherencia con el capítulo 4, las estaciones se modelizan como infraestructuras de compresión, almacenamiento y dispensación abastecidas externamente, y el cálculo se centra en el coste nivelado del hidrógeno dispensado. El LCOH en estación se obtiene a partir del CAPEX de la estación CSD, los costes de operación, la vida útil, la tasa de descuento, el coste del hidrógeno suministrado y la utilización estimada en la etapa anterior.

A lo largo de todo el proceso se mantienen dos decisiones estructurales. La primera es limitar el análisis a la red TEN-T, donde AFIR formula sus obligaciones para el hidrógeno. La segunda es separar en el tiempo la resolución del problema espacial y la incorporación de la demanda y de la economía: primero se determina la red mínima de cumplimiento, y solo después se analiza cómo podría utilizarse y qué coste tendría operar las estaciones en los emplazamientos seleccionados.

5.2 PREPROCESAMIENTO DE LA RED Y ELEMENTOS ESPACIALES

El preprocesamiento de la red viaria constituye la primera etapa operativa de la metodología y tiene como finalidad transformar la representación cartográfica de la red TEN-T procedente de Hermes en una estructura topológica apta para el cálculo de distancias de red y para la generación posterior de localizaciones candidatas.

El punto de partida ha sido la capa de ejes viarios de Hermes correspondiente a la red TEN-T en España, exportada en formato vectorial estándar. A partir de esa capa se han seleccionado únicamente los tramos que forman parte de la red básica objeto del análisis, descartando elementos auxiliares (ramales de enlace menores, accesos locales, etc.) que no aportan conectividad relevante a escala de corredor. Sobre este subconjunto se realizó una comprobación básica de integridad geométrica,

eliminando tramos duplicados, segmentos con longitud nula y pequeños artefactos cartográficos que podían generar nodos espurios en la construcción posterior del grafo.

Adicionalmente se ha desarrollado un trabajo de conexión entre tramos que presentaban pequeñas desconexiones puntuales y que hacían que el sistema de carreteras no funcionase como un componente único, sino que estuviese dividido en diferentes “islas” desconectadas entre sí. A continuación, se dejan algunos ejemplos de estos saltos que la cartografía de Hermes presentaba y que iba a dificultar el cálculo de flujos de mercancías a lo largo de la red.

Para poder detectar y comprobar que los ajustes verdaderamente surtían efecto se ha utilizado QGIS como herramienta de representación de la red.



Ilustración 3: Ejemplos de desconexiones en la red TEN-T de Hermes

Si no se hubiesen corregido estas desconexiones, los flujos de demanda obtenidos no hubiesen sido realistas ni representativos, dado que corredores importantes no hubiesen mostrado su flujo real.

Como resultado de este ajuste, se obtiene una componente principal propia de todas las carreteras españolas de la península, y luego componentes secundarias propias de las carreteras de la red TEN-T de las Islas Canarias y las Islas Baleares.

Además, para trabajar con distancias métricas coherentes, todas las geometrías se reproyectaron desde el sistema de referencia original empleado en Hermes al sistema ETRS89 / UTM zona 30N (EPSG:25830), que resulta adecuado para análisis de accesibilidad en el ámbito peninsular español. Esta reproyección permite expresar la longitud de cada tramo directamente en metros y kilómetros, facilitando tanto el cálculo de distancias de red como la aplicación posterior de radios urbanos y umbrales de separación máxima entre estaciones.

A partir de la red reproyectada se construyó un grafo no dirigido utilizando la librería NetworkX, un paquete de Python para la creación y análisis de redes complejas ampliamente utilizado en

aplicaciones científicas (Hagberg et al., 2008). Cada tramo viario se representó como una arista del grafo, ponderada por su longitud en kilómetros, mientras que los nodos se definieron como los extremos de dichos tramos. Para evitar la proliferación de nodos casi coincidentes debida a pequeñas diferencias numéricas en las coordenadas, se homogeneizaron los puntos de inicio y fin de los segmentos mediante un redondeo controlado de coordenadas, de forma que intersecciones que en la cartografía son visualmente únicas se correspondieran también con nodos únicos en el grafo. El resultado fue un primer grafo detallado que reproduce fielmente la geometría de la red TEN-T extraída de Hermes.

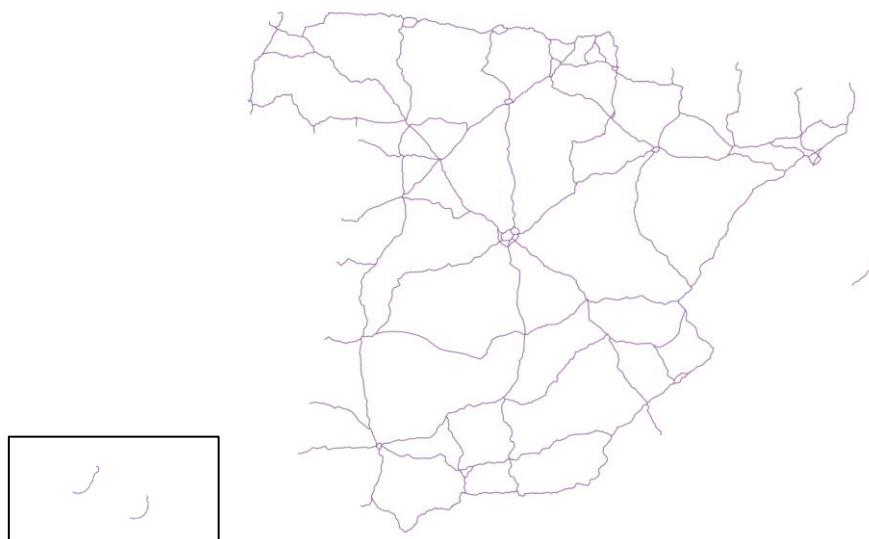


Ilustración 4: Grafo inicial de carreteras TEN-T obtenido tras procesamiento

Este grafo inicial, aunque topológicamente correcto, resultaba excesivamente denso para los fines del modelo, ya que incluye numerosos nodos que no representan decisiones de ruta (por ejemplo, vértices intermedios introducidos solo para describir la curvatura de un tramo). Por ello, se aplicó un proceso de simplificación topológica centrado en eliminar nodos de grado 2 que actúan únicamente como puntos de paso entre dos segmentos consecutivos sin bifurcación. Las cadenas de aristas unidas por este tipo de nodos se sustituyeron por una única arista equivalente cuya longitud es la suma de las longitudes originales, manteniendo intacta la conectividad entre intersecciones y extremos de corredor.

La simplificación redujo de forma significativa el tamaño del grafo, pasando de varios miles de nodos y aristas en la versión derivada directamente de Hermes a un grafo simplificado con un número mucho menor de elementos, pero que conserva exactamente la misma lógica de conexión entre puntos

relevantes de la red. Esta reducción del tamaño del grafo tiene un impacto directo en el coste computacional de los cálculos posteriores de caminos mínimos y en la construcción de las matrices de cobertura, sin alterar las distancias efectivas que se recorren entre nodos de interés.

Ceuta y Melilla se excluyeron del ámbito del modelo, puesto que el objetivo del trabajo se centra en el diseño de la infraestructura sobre los itinerarios principales de la red TEN-T peninsular y dichas localizaciones no cuentan con superficie ni tránsito suficiente.

El resultado de esta etapa es, por tanto, un grafo ponderado derivado de la cartografía de Hermes, suficientemente depurado y simplificado como para servir de soporte a las operaciones posteriores de generación de candidatos y cálculo de distancias sobre red. Sobre este grafo se construyen en los apartados siguientes los radios urbanos, los puntos de control interurbanos y las matrices de cobertura que alimentan la formulación del modelo de programación lineal entera mixta.

5.3 CONSTRUCCIÓN DE LA CAPA DE DEMANDA

Esta segunda etapa metodológica parte de la base de datos ETISPLUS, que proporciona matrices origen-destino de transporte de mercancías por carretera a escala NUTS-3 para un conjunto amplio de países europeos.

Esta base resulta especialmente útil porque ofrece una representación homogénea de los flujos de mercancías entre regiones y permite trabajar con una lógica de red compatible con el resto de la metodología. Sin embargo, su utilización directa en el presente estudio no era posible sin una adaptación previa, por dos motivos principales. En primer lugar, la información de partida corresponde al año 2010, por lo que no refleja el volumen actual del transporte de mercancías por carretera. En segundo lugar, su cobertura espacial excede ampliamente el ámbito del trabajo, que se limita a España y a sus relaciones terrestres inmediatas con Portugal y Francia.

A partir de esta base original, el primer paso consistió en restringir el conjunto de pares origen-destino al subconjunto relevante para el caso español. En concreto, se conservaron únicamente tres tipos de relaciones: los pares OD íntegramente españoles, los pares con origen en España y destino en Portugal o Francia, y los pares con origen en Portugal o Francia y destino en España. Quedaron, por tanto, excluidos todos los movimientos entre terceros países europeos que no tuvieran origen o destino en

territorio español, ya que su incorporación habría sobredimensionado artificialmente la demanda susceptible de generar repostajes sobre la red TEN-T española.

Esta decisión metodológica responde a la lógica del problema estudiado: el interés no es reconstruir la totalidad del transporte europeo, sino aproximar de forma realista los flujos que efectivamente pueden dar lugar a demanda de hidrógeno en los corredores españoles.

Una vez filtrado el ámbito espacial, fue necesario actualizar temporalmente la información de ETISPLUS. La base original está referida a 2010, mientras que para este trabajo se ha tomado como referencia 2024 por ser el último año con información consolidada disponible en Eurostat sobre transporte de mercancías por carretera. Para salvar esa discontinuidad temporal se aplicó un factor de ajuste multiplicativo (1,05x) que permite escalar los flujos desde su nivel base hasta una magnitud compatible con el volumen real observado en 2024. De este modo, la matriz OD deja de interpretarse como una fotografía histórica de 2010 y pasa a utilizarse como una estructura espacial de relaciones de transporte cuya intensidad se recalibra con datos recientes.

El siguiente paso consistió en traducir las magnitudes de mercancía transportada a un número estimado de camiones. Esta conversión era necesaria porque ETISPLUS trabaja de forma natural con flujos de mercancías (en toneladas), mientras que la demanda potencial de repostaje depende del paso de vehículos pesados por la red.

Para realizar esta transformación se adoptó un valor medio de 10 toneladas por camión, obtenido a partir de la información publicada en 2025 por el Observatorio del transporte de mercancías por carretera del MITMS (MITMS, 2025). Bajo esta hipótesis, el flujo de toneladas asociado a cada relación OD puede convertirse en una estimación del número de camiones equivalentes que la recorren, proporcionando una métrica más directamente vinculada con la utilización potencial de una estación de hidrógeno.

A partir de aquí, la tarea consiste en trasladar esos flujos zonales a la red viaria concreta sobre la que opera el modelo. Para ello se parte de la capa de zonas ETISPLUS reprojectada al sistema métrico ETRS89 / UTM zona 30N y se calcula el centroide geométrico de cada zona como punto representativo de su demanda agregada. Estos centroides no se conectan de forma arbitraria a la red, sino que se enganchan al grafo TEN-T español identificando el tramo de carretera más próximo dentro de un radio de búsqueda prefijado y proyectando el punto sobre dicho tramo, dividiéndolo si es

necesario e introduciendo un nuevo nodo de red unido al centroide mediante un arco de conexión artificial.

El resultado es un conjunto de nodos de red específicos que garantiza que todas las zonas relevantes de ETISPLUS queden efectivamente conectadas al grafo.

Una vez que cada zona de origen y de destino dispone de un nodo asociado en la red TEN-T, se ejecuta la asignación de flujos mediante un procedimiento *all-or-nothing* basado en caminos mínimos. Para cada relación origen-destino filtrada, el script traduce las zonas de origen y destino a sus nodos correspondientes y utiliza la función de NetworkX, con la longitud de tramo como peso, para calcular el itinerario de menor distancia entre ambos nodos. Toda la demanda de la relación se asigna al camino mínimo resultante y se acumula sobre los tramos que lo componen. El algoritmo subyacente es Dijkstra, que garantiza que las distancias empleadas en la asignación corresponden siempre a rutas mínimas sobre el grafo ponderado de la red TEN-T española.

Dado un grafo con conjunto de nodos V y aristas E , y un peso w_{uv} asociado a cada arista (u, v) , el algoritmo de Dijkstra calcula para un nodo origen s la distancia mínima $d(v)$ a cada nodo $v \in V$ como:

$$d(v) = \min_{p \in \mathcal{P}(s,v)} \sum_{(i,j) \in p} w_{ij}$$

donde $\mathcal{P}(s, v)$ es el conjunto de todos los caminos que conectan s con v en el grafo.

Este punto es clave porque permite enlazar la base de datos OD con la infraestructura física utilizada por el modelo. ETISPLUS proporciona relaciones regionales de transporte; la conexión de centroides las ancla en nodos concretos de la red; y la asignación por caminos mínimos convierte esas relaciones en intensidades de paso sobre arcos determinados. De este modo, la información de mercancías deja de estar definida en una matriz abstracta entre regiones y pasa a expresarse como tráfico pesado distribuido espacialmente sobre los corredores TEN-T españoles.

El script incorpora, además, varios controles para asegurar la consistencia de la asignación. El resultado de esta etapa es una red TEN-T española en la que cada tramo queda asociado a un flujo estimado, ya actualizado a 2024, restringido al ámbito geográfico relevante del estudio y derivado de una conversión explícita desde toneladas transportadas a vehículos equivalentes.

5.4 CONSTRUCCIÓN DE NODOS, CANDIDATOS Y PUNTOS DE CONTROL

Una vez preprocesada la red viaria y construida la capa de demanda, el siguiente paso consiste en definir el conjunto discreto de elementos espaciales sobre los que se formula el problema de localización.

Esta etapa es decisiva, porque el modelo no optimiza sobre un espacio continuo, sino sobre un conjunto finito de candidatos y puntos de control extraídos de la propia red TEN-T. En consecuencia, antes de formular el MILP es necesario establecer qué localizaciones pueden albergar potencialmente una estación, qué nodos urbanos deben considerarse de cobertura obligatoria y qué puntos intermedios permiten traducir el requisito reglamentario de separación máxima entre estaciones en una colección finita de restricciones operativas.

El punto de partida son los nodos urbanos TEN-T definidos manualmente en el script mediante una tabla de coordenadas en ETRS89 / UTM zona 30N. Cada nodo urbano se representa por un punto centroidal asociado a una ciudad o área urbana relevante para la red transeuropea y se incorpora al modelo con un identificador único. No obstante, no todos los nodos definidos inicialmente se mantienen en el análisis final. El script excluye expresamente determinados, como Ceuta y Melilla, con el objetivo de mantener la coherencia espacial entre el ámbito del modelo y la componente conexa peninsular sobre la que se ha construido el grafo.

A partir de estos nodos urbanos se generan candidatos urbanos sobre la propia red. El procedimiento no consiste en imponer una estación exactamente en el centroide urbano, sino en identificar localizaciones viables dentro de su entorno de influencia. Para ello, el script utiliza un radio euclidiano de 15 km alrededor de cada nodo urbano y muestrea puntos sobre la red con una separación de 3 km. Cada uno de esos puntos se proyecta posteriormente al nodo más próximo del grafo mediante una búsqueda de vecino más cercano sobre un árbol cKDTree de la librería SciPy (Virtanen et al., 2020), de forma que toda localización candidata queda asociada a un nodo real de la red y a una distancia de ajuste que cuantifica la desviación entre el punto geométrico generado y su representación topológica final.

Este planteamiento responde a una consideración metodológica importante. En un problema real de despliegue de infraestructura no tiene sentido asumir que la estación debe ubicarse exactamente en el centroide urbano, ya que la disponibilidad de suelo, la accesibilidad viaria y la geometría efectiva del

corredor suelen desplazar la localización óptima hacia puntos periféricos o tangenciales a la malla principal. Al trabajar con un conjunto de candidatos distribuidos dentro de un radio de 15 km, el modelo conserva esa flexibilidad sin perder el vínculo funcional con el nodo urbano que debe quedar cubierto.

Una vez generados los candidatos urbanos, el script asigna a cada uno varios atributos. Además de su identificador, su tipo y el nodo del grafo al que queda asociado, cada candidato conserva la referencia al nodo urbano del que procede y la distancia euclidiana al centroide urbano. Sobre esa base se calcula una puntuación de equilibrio que combina proximidad al centroide y capacidad potencial de captar demanda en 10 km a la redonda (por ello era necesario calcular e incluir los flujos de demanda antes de empezar esta etapa), y que sirve para priorizar la selección de una localización concreta dentro del conjunto de candidatos asociados a una misma ciudad.

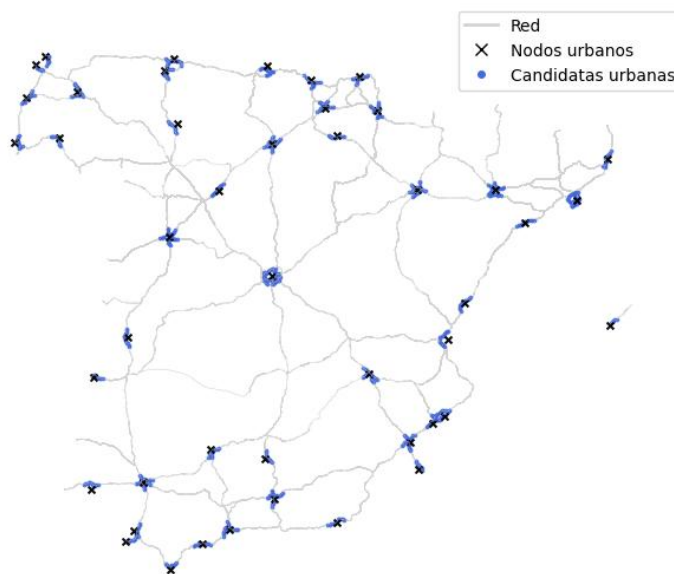


Ilustración 5: Representación de candidatas urbanas

A continuación, en base a la puntuación de equilibrio calculada, por cada nodo urbano se selecciona un único candidato válido, garantizando así lo estipulado por AFIR. Esta decisión responde a dos motivos: por un lado, evitar soluciones redundantes o poco realistas en las que varias hidrolíneas compiten dentro del mismo entorno urbano obligatorio; por otro, simplificar el problema de optimización reduciendo el número de variables y fijando de antemano las estaciones que la regulación exige en dichos nodos.

En coherencia con esta lógica, el modelo no genera candidatos interurbanos adicionales en un radio de 50 km alrededor de cada nodo urbano, de modo que las estaciones interiores a ese entorno quedan reservadas al cumplimiento de las obligaciones AFIR y la red interurbana se concentra en los tramos de corredor situados entre estos núcleos.

En paralelo, el script construye el conjunto de candidatos interurbanos. En este caso, el objetivo es cubrir los tramos de corredor situados fuera de los entornos urbanos obligatorios y generar una malla de posibles emplazamientos sobre la red básica. Para ello se toman los ejes de flujo ya agregados por carretera y se muestrean puntos sobre sus geometrías con un espaciamiento de 30 km. Este valor no responde a un requisito normativo específico, sino a un compromiso metodológico: es lo bastante denso como para garantizar que existan alternativas razonables de localización a lo largo de los corredores, pero reduce el número de candidatos interurbanos a un volumen manejable desde el punto de vista computacional; en otros escenarios podría explorarse una configuración distinta como análisis de sensibilidad. Estos candidatos interurbanos tienen ya en cuenta las localizaciones urbanas fijas seleccionadas en el paso anterior, de forma que no se duplican o consideran localizaciones que ya pueden ser cubiertas por las hidrolíneas urbanas.

Como ocurría con los candidatos urbanos, cada punto se asocia al nodo más próximo del grafo mediante cKDTree, quedando registrado tanto su nodo topológico como la distancia de ajuste correspondiente.

Para cada candidata interurbana, el script calcula una puntuación de prioridad basada en la demanda potencial de hidrógeno captada en un radio de 10 km. Esta magnitud se estima a partir del flujo accesible en el entorno del emplazamiento, transformado en camiones/día y posteriormente en demanda potencial de H₂ mediante una cuota de camiones de hidrógeno del 1%, una probabilidad de parada del 10% para localizaciones interurbanas (5% para urbanas) y una cantidad media repostada de 60 kg por vehículo.

Estos parámetros se han fijado como hipótesis de referencia: el radio de 10 km refleja un entorno de influencia razonable para una estación sobre corredor, la cuota del 1% representa un escenario conservador de penetración temprana de camiones de hidrógeno en la flota pesada, las probabilidades de parada corresponden a tasas moderadas de uso en redes aún incipientes y la cantidad media de 60 kg por repostaje se alinea con las capacidades típicas de almacenamiento a bordo consideradas en

estudios recientes sobre camiones de hidrógeno de larga distancia. En otros escenarios podrían explorarse valores alternativos como análisis de sensibilidad.

A continuación, se comparte un mapa con los posibles candidatos a estudiar mediante el MILP. Como se puede ver en la imagen, alrededor de los nodos urbanos se respeta la distancia de cobertura de 50 km, por ello no hay candidatos cercanos o en ciertos tramos de la red.

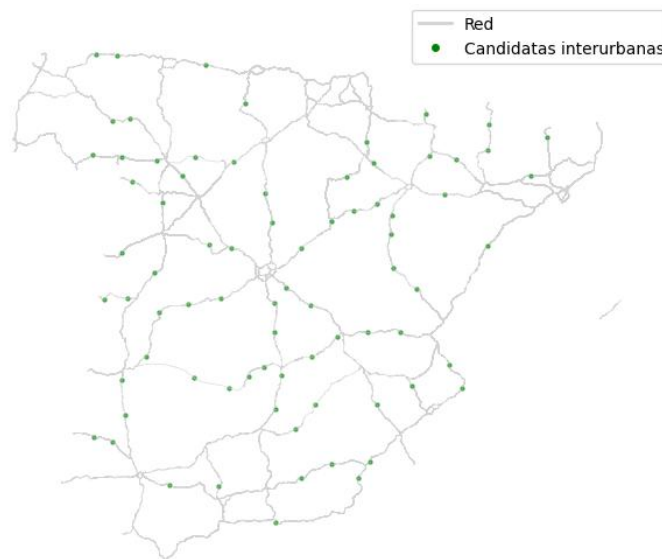


Ilustración 6: Candidatas interurbanas a lo largo de la red

Junto con los candidatos urbanos e interurbanos, el tercer conjunto esencial es el de puntos de control interurbanos. Su función es operacionalizar la exigencia de AFIR de que la separación máxima entre estaciones no supere 200 km a lo largo de la red. En lugar de comprobar esta condición sobre todos los puntos de los corredores, lo que llevaría a un problema continuo difícil de manejar, el script discretiza la red mediante una colección de puntos de control asociados también a nodos del grafo y a distancias de ajuste. Cada punto de control representa un punto de verificación: si existe al menos una estación accesible a distancia de red admisible desde ese punto, se considera satisfecha localmente la condición de cobertura sobre el corredor.

El interés de esta discretización es que permite traducir una regla geométrica continua en una estructura compatible con un modelo discreto de optimización. La condición “disponer de una estación cada 200 km” deja así de interpretarse como una propiedad abstracta del corredor y pasa a expresarse como una familia finita de restricciones de cobertura sobre un conjunto de puntos

concretos. Esta es, en la práctica, la pieza que conecta la lógica regulatoria de AFIR con la formulación algebraica posterior del MILP.

Para su correcta ejecución lo que ha hecho es establecer una separación de 25 km entre todos los puntos de control a lo largo de la red y analizado que la distancia entre el punto de control y la hidrolinera más cercana no supere la mitad de la distancia máxima de separación establecida por la AFIR. De esta forma se garantiza que las hidrolineras cumplen lo exigido y se evita que un punto de control caiga justo entre dos y de una separación real mayor.

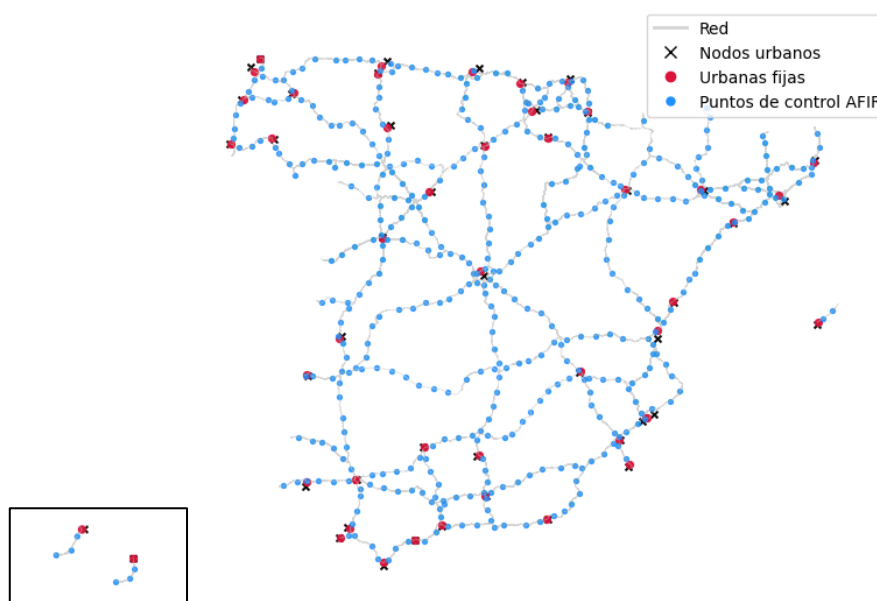


Ilustración 7: Puntos de control a lo largo de la red

Antes de entrar en la optimización propiamente dicha, el script identifica además qué puntos de control quedan ya cubiertos por los candidatos urbanos fijados por regla. Esta operación es importante porque evita imponer al modelo interurbano obligaciones de cobertura que ya han quedado satisfechas por estaciones urbanas seleccionadas ex ante.

El resultado de toda esta etapa es un sistema discreto compuesto por tres conjuntos bien diferenciados: candidatos urbanos ligados a nodos TEN-T de cobertura obligatoria, candidatos interurbanos priorizados según demanda potencial y puntos de control distribuidos sobre los corredores para verificar el cumplimiento de AFIR. Solo una vez definidos estos tres elementos y vinculados todos ellos al mismo grafo ponderado tiene sentido formular el problema de localización como un modelo de programación lineal entera mixta.

5.5 FORMULACIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

Una vez contruidos el grafo viario, la capa de demanda y el conjunto de candidatos urbanos, candidatos interurbanos y puntos de control, el problema se formula como un modelo de optimización binaria. En este punto ya no se trabaja sobre una red continua ni sobre geometrías en bruto, sino sobre un conjunto discreto de localizaciones posibles y de condiciones de cobertura previamente definidas. La formulación se inspira directamente en el *Flow Refueling Location Model* (FRLM), adaptado aquí a las restricciones específicas de AFIR y a una red de transporte representada de forma explícita como grafo.

En su planteamiento clásico, el FRLM busca determinar en qué puntos de una red conviene ubicar estaciones para que los flujos de vehículos puedan completar sus recorridos dentro de una determinada autonomía.

En este trabajo se mantiene esa lógica de continuidad del viaje, pero se traduce a una formulación más operativa para el caso analizado: en lugar de trabajar con rutas OD completas o con combinaciones de repostaje a lo largo de cada trayecto, el problema se reformula como una cobertura sobre puntos de control distribuidos a lo largo de los corredores TEN-T. De este modo, la continuidad exigida por la regulación se representa mediante un conjunto finito de puntos que deben quedar atendidos por alguna estación accesible sobre la red.

La primera decisión importante es distinguir entre los elementos que el modelo recibe como datos de entrada y los que realmente decide. Los nodos urbanos obligatorios ya han sido identificados en la etapa anterior y, para cada uno de ellos, se ha seleccionado un candidato urbano que actúa como solución fija de cobertura local. Estos emplazamientos entran ya incorporados al sistema como estaciones seleccionadas ex ante y en el script aparecen marcados como estaciones fijadas por regla, por lo que no compiten entre sí dentro del proceso de optimización. A partir de ese momento, el papel del modelo consiste fundamentalmente en completar la cobertura interurbana de la red mediante la elección de candidatos adicionales.

De esta forma el MILP ya no necesita decidir toda la red desde cero, sino únicamente resolver qué estaciones interurbanas deben añadirse a una base urbana ya consolidada. Así, la formulación conserva la lógica del FRLM, pero la aplica sobre una estructura parcialmente fijada por condicionantes normativos previos.

Sobre esta base, el conjunto de decisión del modelo queda formado por los candidatos interurbanos preseleccionados en la etapa anterior. Las estaciones urbanas ya fijadas se incorporan como elementos forzados a estar activos, de modo que el *solver* solo decide sobre las localizaciones interurbanas. En consecuencia, el problema consiste en encontrar la combinación de candidatos interurbanos que, junto con las estaciones urbanas fijas, permita cubrir los requisitos espaciales del corredor.

La función objetivo responde a una lógica sencilla: minimizar el número de estaciones interurbanas adicionales necesarias para “cubrir” la red. En la implementación concreta del script, el modelo se resuelve maximizando una prioridad asociada a cada estación y restando una penalización a las interurbanas, lo que en la práctica empuja a obtener una solución contenida y evita incorporar emplazamientos innecesarios. Aunque esta formulación operativa no reproduce literalmente el FRLM original, sí mantiene su principio esencial: alcanzar la cobertura requerida (Z) con el menor despliegue posible o, al menos, sin redundancias injustificadas.

En términos matemáticos, la función objetivo utilizada en el MILP se expresa como:

$$\max Z = \sum_{i \in I} P_i x_i - \sum_{i \in I_{\text{int}}} \omega x_i$$

donde x_i es la variable binaria que indica si se selecciona la localización i , P_i es la prioridad asociada a la demanda captada por la estación i , I_{int} es el subconjunto de candidatos interurbanos y ω es la penalización aplicada a cada estación interurbana adicional.

La principal familia de restricciones es la de cobertura interurbana. El requisito se traduce en una condición discreta muy directa: cada punto de control debe quedar cubierto por al menos una estación factible. Formalmente, la condición de cobertura se formula como:

$$\sum_{i \in I} A_{ij} x_i \geq 1 \forall j \in J$$

donde J es el conjunto de puntos de control y $A_{ij} = 1$ si la estación i cubre el punto de control j dentro del radio admisible, y $A_{ij} = 0$ en caso contrario.

La restricción de separación mínima se expresa como:

$$x_i + x_k \leq 1 \forall i, k \in I \text{ tales que } D_{ik} = 1, i \neq k$$

donde $D_{ik} = 1$ indica que las candidatas i y k se encuentran a menos de 30 km de distancia entre sí.

Este paso es el que conecta de forma más clara la formulación con el FRLM. En el modelo original, la cobertura depende de que el flujo pueda recorrer su trayecto reabasteciéndose dentro de los límites de autonomía; aquí, esa misma lógica se aproxima mediante puntos de control sobre el corredor, de modo que, si todos ellos disponen de una estación accesible dentro del radio admisible, se entiende que la continuidad espacial del viaje queda garantizada. La diferencia es, por tanto, metodológica más que conceptual: no se sigue cada flujo completo de extremo a extremo, pero sí se conserva la idea de asegurar repostaje suficiente a lo largo del recorrido.

Además, antes de resolver el MILP se identifica qué puntos de control ya quedan cubiertos por las estaciones urbanas fijadas. Esta comprobación se realiza explícitamente y permite distinguir entre controles que ya están satisfechos de entrada y controles que todavía requieren intervención interurbana.

Esto hace que el modelo actúe solo allí donde persiste una necesidad real de cobertura y evita introducir decisiones superfluas en tramos ya resueltos por la red urbana obligatoria.

Junto a la cobertura, el modelo incorpora una segunda condición espacial: evitar una concentración innecesaria de estaciones en tramos demasiado próximos entre sí. Para ello se calcula la distancia entre pares de candidatos y se identifican aquellos cuya proximidad es inferior al umbral mínimo fijado para el estudio, establecido en 30 km. Esta restricción no forma parte del FRLM canónico, pero resulta coherente con su lógica de despliegue eficiente, ya que impide soluciones redundantes en las que dos estaciones compiten prácticamente sobre el mismo tramo sin mejorar de manera apreciable la cobertura de la red.

Así, el modelo no solo exige cubrir los corredores, sino hacerlo con una configuración territorialmente razonable. El resultado es una formulación que combina la lógica de continuidad espacial heredada del FRLM con una capa adicional de racionalización del despliegue adaptada al contexto del estudio.

En conjunto, la formulación puede entenderse como una adaptación del FRLM a un problema de localización en red condicionado por AFIR. Su aportación principal no está en reproducir literalmente el modelo clásico, sino en trasladar su lógica de continuidad del repostaje a una estructura más manejable para el caso español, basada en un grafo viario, estaciones urbanas fijadas, candidatos interurbanos y puntos de control sobre corredor. A partir de esta base, el modelo proporciona una propuesta de despliegue espacialmente coherente y directamente interpretable desde el punto de vista regulatorio y territorial.

5.6 CAPACIDAD, UTILIZACIÓN Y LCOH POR HIDROLINERA

Una vez obtenida la configuración final de estaciones mediante el modelo de optimización, la última etapa de la metodología consiste en caracterizar cada hidrolinera en términos de demanda atendida, capacidad recomendada, grado de utilización esperado y coste nivelado del hidrógeno en estación (LCOH). Este bloque cierra el recorrido desde la planificación espacial hasta la evaluación técnico-económica, permitiendo interpretar la red resultante no solo como un conjunto de localizaciones, sino también como un conjunto de activos con tamaños y costes unitarios diferenciados.

Estimación de la demanda asignada por estación

Una vez resuelto el MILP y fijada la red definitiva, esta demanda potencial se reasigna para obtener la demanda efectivamente atribuida a cada hidrolinera en la configuración final. El procedimiento identifica, para cada tramo de flujo, la estación más cercana y compatible en términos de distancia sobre red y suma las contribuciones correspondientes, dando lugar a una magnitud que representa la demanda diaria de hidrógeno finalmente asignada a cada estación dentro de la solución. Esta es la variable que se utiliza en las etapas posteriores de dimensionamiento de capacidad, cálculo de utilización y estimación del LCOH en estación.

Reglas de dimensionamiento de capacidad

El dimensionamiento de la capacidad nominal de cada hidrolinera busca evitar obtener capacidades excesivamente específicas poco realistas en una fase de planificación estratégica.

A partir de la demanda asignada, se aplica la siguiente regla de diseño: la capacidad recomendada se obtiene redondeando por exceso la demanda diaria asignada al entero más próximo, con un mínimo de 1 t/día para cumplir con lo exigido por AFIR.

Esta regla se implementa mediante una función de asignación que transforma la demanda diaria de hidrógeno de cada estación en una capacidad nominal. Con ello se consigue trabajar con escalones tecnológicos razonables, evitando diseñar capacidades “a medida” que difícilmente se corresponderían con soluciones comerciales disponibles. Además, esta discretización facilita el posterior análisis económico al permitir vincular los rangos de capacidad con paquetes de inversión representativos.

Cálculo de la utilización

El grado de utilización de cada hidrolinera se define como la relación entre la demanda diaria asignada y su capacidad nominal, expresada en porcentaje. Esta magnitud se calcula como:

$$\text{Utilización (\%)} = \frac{\text{assigned_h2_t_day}}{\text{recommended_capacity_tpd}} \times 100$$

A partir de este valor, las estaciones se agrupan en intervalos de utilización (0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80% y 80-100%), lo que permite obtener un diagnóstico sintético del grado de aprovechamiento de la red resultante: cuántas estaciones trabajan muy por debajo de su capacidad, cuántas lo hacen en un rango intermedio y cuántas operan cerca de su límite nominal.

Esta medida de utilización es un enlace directo entre la lógica espacial y la dimensión económica. Estaciones con baja utilización pueden ser necesarias para garantizar la continuidad de la cobertura sobre los corredores, pero también serán candidatas a mostrar valores elevados de LCOH en estación al repartir su inversión y sus costes fijos sobre un volumen reducido de hidrógeno suministrado.

Por el contrario, estaciones con alta utilización tienden a aprovechar mejor las economías de escala, reduciendo su coste unitario de suministro siempre que no se produzcan saturaciones operativas.

Enfoque para el cálculo del LCOH en estación

El coste nivelado del hidrógeno (LCOH) en estación se define como el cociente entre el valor actualizado de todos los costes asociados a la estación durante el horizonte del proyecto y el valor actualizado de toda la cantidad de hidrógeno suministrada en ese periodo.

En este trabajo, el LCOH en estación se calcula para cada hidrolinera a partir de la combinación de su capacidad nominal, su grado de utilización esperado y un conjunto homogéneo de hipótesis técnico-económicas sobre inversión, operación y vida útil. El objetivo no es tanto predecir un precio exacto de mercado, sino disponer de un indicador que permita comparar estaciones y tipologías dentro de la red.

Se asume que cada hidrolinera incluye al menos los siguientes componentes: sistema de compresión, almacenamiento intermedio, dispensadores y obra civil e instalaciones auxiliares. En el caso de este trabajo se considera un escenario de suministro externo por lo que hay que considerar un coste de compra del hidrógeno a la entrada de la instalación. El LCOH en estación integra entonces: la

inversión inicial (CAPEX) de cada componente; los costes fijos y variables de operación y mantenimiento (OPEX) y el coste de la electricidad necesaria para compresión.

Hipótesis numéricas adoptadas

Para que el cálculo del LCOH en estación sea transparente y reproducible, es necesario explicitar las principales hipótesis numéricas. En coherencia con la literatura reciente sobre hidrolineras y producción de hidrógeno, se adoptan las siguientes referencias para el conjunto de estaciones analizadas:

- Horizonte temporal del proyecto de 20 años, con una tasa de descuento del 8% aplicada a todos los flujos de caja.
- Vida útil de los equipos principales alineada con ese horizonte.
- Coste de inversión por rango de capacidad.
- Costes de operación y mantenimiento expresados como un porcentaje anual del CAPEX (3% como hipótesis preliminar), compatible con los valores reportados en estudios de análisis tecno-económico de estaciones de hidrógeno.
- Coste de adquisición del hidrógeno en planta equivalente a un valor medio de referencia.
- Factor de utilización anual de cada estación derivado de la utilización calculada en el modelo.

Estas hipótesis se aplican de forma homogénea a todas las estaciones de la red, de modo que las diferencias en LCOH en estación reflejan principalmente la combinación de tamaño, utilización y características de la localización, y no una variación arbitraria de parámetros económico-financieros.

Tabla 1: Parámetros LCOH en estación

Parámetro	Valor adoptado	Fuente
Coste suministro H2 (entregado a estación)	6 €/kg H2	International Council on Clean Transportation. (2022)
CAPEX	1,8 M€/tonelada-día ⁴	U.S. Department of Energy. (2021)
OPEX fijo	3% del CAPEX	Ramsden, T., & Lipman, T. (2021)
OPEX variable	1 €/kg H2	Caponi et al. (2022)

⁴ Conforme aumenta la capacidad de la estación, ésta se beneficia de economías de escala.

Integración de la utilización en el LCOH en estación

A partir del volumen de demanda obtenido por estación, se calculan los costes variables y se reparte la inversión y los costes fijos a lo largo de la vida útil del proyecto, descontando cada flujo de caja según la tasa especificada.

De este modo, el LCOH en estación se convierte en un indicador directamente influido por las decisiones espaciales y de dimensionamiento tomadas en fases anteriores. Estaciones con baja utilización tienden a mostrar valores elevados, mientras que aquellas que combinan tamaños adecuados con niveles de uso altos presentan costes nivelados más competitivos.

Esta lectura permite evaluar hasta qué punto la solución espacial obtenida para cumplir con AFIR es también razonable desde la perspectiva económico-financiera, e identificar, si fuera necesario, tramos donde podría resultar conveniente ajustar capacidades o explorar modelos alternativos de prestación del servicio.

Es importante remarcar que las estimaciones realizadas para las capacidades y utilidades parten de datos oficiales para 2024, pero que la regulación no entra hasta 2030, por lo que este trabajo se postula como una exploración inicial que puede ser actualizada más adelante.

Análisis de sensibilidad

Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad sobre la distancia máxima entre estaciones a lo largo de los corredores TEN-T, modificando el umbral AFIR adoptado en la formulación del modelo.

Complementariamente también se analiza el impacto en la utilización y LCOH promedio de las instalaciones un cambio en el tamaño mínimo disponible para las hidrolineras.

Esto permite evaluar hasta qué punto los resultados espaciales y económico-operativos dependen del criterio de distancia máxima, identificando configuraciones en las que un relajamiento o endurecimiento de la exigencia de AFIR conduce a redes más o menos densas, con distinto número de estaciones, distintos niveles de utilización y diferentes costes nivelados de hidrógeno.

Capítulo 6. RESULTADOS

6.1 RED RESULTANTE

En el escenario base (separación máxima de 200 km), el modelo obtiene una solución formada por 92 hidrolineras distribuidas sobre la red TEN-T analizada. De ellas, 47 corresponden a estaciones urbanas incorporadas de forma fija y 45 a estaciones interurbanas seleccionadas por el modelo.

En conjunto, la red combina por tanto una base urbana relativamente estable con un subconjunto de estaciones en corredor que el modelo activa solo cuando resultan necesarias.

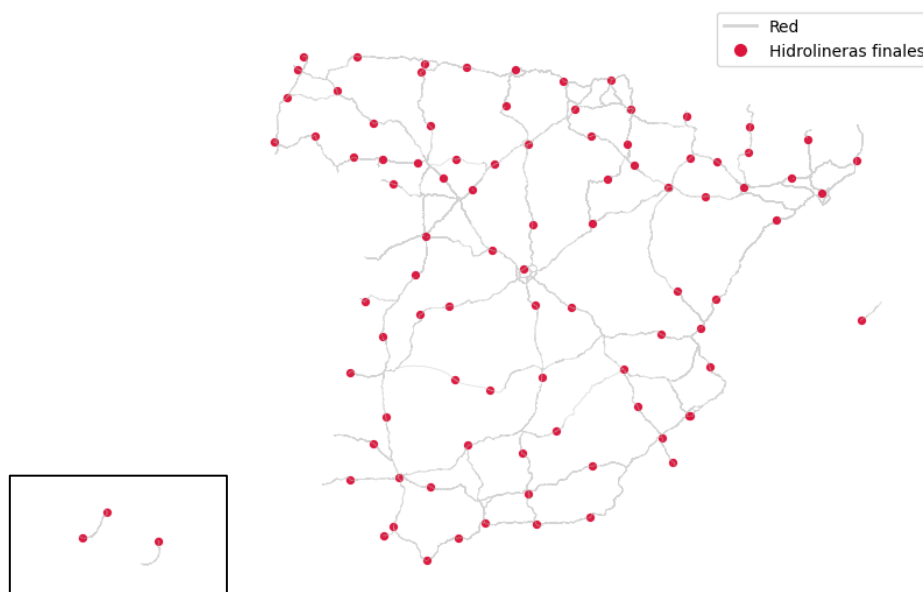


Ilustración 8: Localizaciones finales de las hidrolineras

La Figura 8 muestra la localización final de estas 92 estaciones sobre la red viaria considerada. El mapa deja ver una malla bastante continua en el ámbito peninsular, con estaciones espaciadas de manera relativamente regular a lo largo de los principales corredores y con un refuerzo claro en torno a los ejes que articulan el centro peninsular con la fachada mediterránea y la cornisa cantábrica.

En las islas se observa un patrón parecido, a menor escala, con unas pocas estaciones que cubren los tramos incluidos en el análisis. Es conveniente recordar que la aparición de hidrolineras en las islas se consigue por el tratamiento diferenciado de las componentes secundarias existentes.

Aunque la densidad aparente de puntos es alta, el resultado no responde a un reparto homogéneo. En los tramos donde confluyen varios corredores, la distancia visual entre estaciones se reduce y aparecen secuencias de puntos próximas entre sí, mientras que, en otros segmentos, especialmente hacia el oeste y en algunas conexiones transversales, la separación es mayor y la red adopta un trazado más abierto. Esta diferencia sugiere que el modelo concentra parte del esfuerzo de cobertura en los corredores más estructurantes, y utiliza menos estaciones allí donde la geometría de la red y las restricciones de distancia permiten mantener mayores intervalos.

El número de estaciones interurbanas seleccionadas también da una pista sobre el grado de selectividad del modelo. De las 78 candidatas disponibles en corredor, 45 acaban entrando en la solución final, lo que significa que en poco menos de la mitad de los posibles emplazamientos quedan descartados. En la práctica, esto se traduce en una red que, vista en el mapa, parece densa pero que, desde el punto de vista de la decisión, es relativamente contenida: no se ha optado por saturar cada corredor con todas las alternativas posibles, sino por elegir un subconjunto que permita cerrar la cobertura manteniendo un número de estaciones razonable.

En términos territoriales, el resultado es coherente con la lógica de un sistema de transporte de largo recorrido. Las estaciones se alinean con los grandes ejes y aparecen bien repartidas a lo largo de ellos, de modo que la red resultante puede interpretarse como una primera aproximación a una malla de hidrolíneas de ámbito nacional.

A partir de esta visión general, los apartados siguientes profundizan en hasta qué punto esta configuración cumple el criterio AFIR de separación máxima y cómo se comporta en términos de demanda asignada, capacidad recomendada, utilización y costes.

6.2 COBERTURA Y PUNTOS DE CONTROL

El cumplimiento del criterio de cobertura se evalúa a partir de 455 puntos de control discretizados sobre los corredores TEN-T, que representan posiciones intermedias donde se verifica la distancia a la hidrolínea más cercana. Cada punto se asocia a un nodo del grafo viario y sirve como aproximación discreta del requisito continuo de separación máxima entre estaciones a lo largo del corredor.

Con la configuración de 92 estaciones descrita en el apartado anterior, el modelo obtiene una solución óptima que cubre correctamente la práctica totalidad de los puntos de control. En la salida numérica

se identifican 22 puntos etiquetados como violaciones del criterio de cobertura, es decir, posiciones para las que el cálculo automático de distancia sobre el grafo supera el umbral máximo definido. En términos brutos, esto equivaldría a algo menos del 5% de los puntos.

Sin embargo, una revisión posterior de estos 22 casos muestra que todos ellos disponen en realidad de una hidrolinera relativamente próxima cuando se inspeccionan manualmente sobre la red. Esto sugiere que las “violaciones” detectadas no responden tanto a un vacío físico de cobertura como a limitaciones en la discretización y en la conexión de los puntos de control con el grafo viario, por ejemplo, por la forma en que se han generado los nodos, se han redondeado las coordenadas o se han asignado los puntos de control a la red.

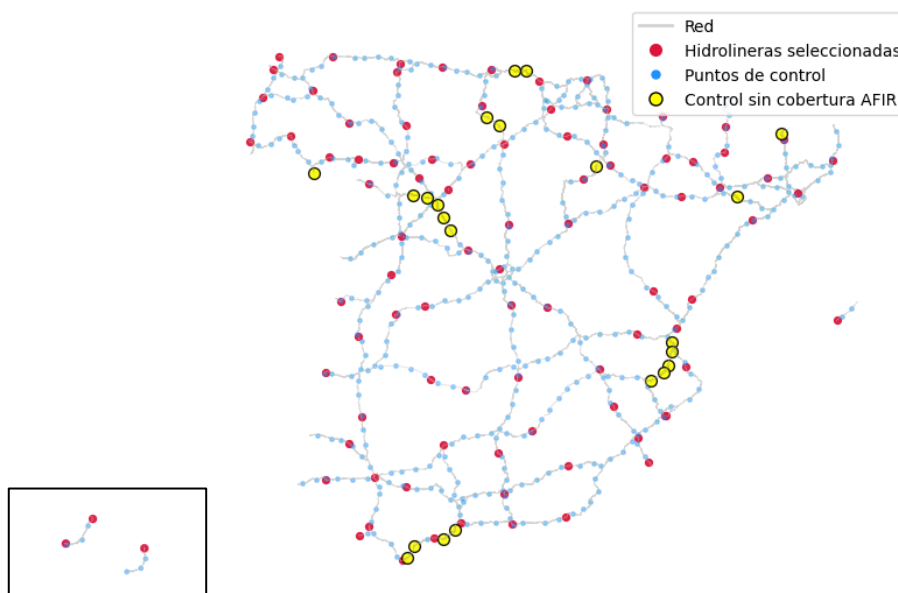


Ilustración 9: Localización de puntos de control no satisfechos

La Figura 9 ilustra esta situación representando los puntos de control y destacando aquellos que el modelo marca como fuera de rango. Visualmente, se observa que estos puntos se sitúan en tramos donde existe una estación cercana sobre el corredor, de modo que la experiencia de un vehículo que circula por la red no se vería comprometida.

En la práctica, la discrepancia se debe a que, para esos puntos concretos, el camino mínimo calculado sobre el grafo no reproduce con exactitud la conexión real más corta hasta la estación, lo que inflaría artificialmente la distancia estimada.

Desde el punto de vista interpretativo, esto obliga a matizar la lectura de los resultados. Formalmente, el script informa de 22 violaciones, pero una vez analizados caso por caso, pueden considerarse como

incidencias de modelización más que como incumplimientos efectivos del criterio. Por lo tanto, la red resultante ofrece una cobertura compatible con el umbral de separación máxima planteado, si bien el procedimiento de discretización y asignación de puntos de control introduce un pequeño margen de error en la medición automática de las distancias.

De cara a la planificación, estos casos siguen siendo útiles porque señalan tramos donde la representación de la red es más delicada y donde convendría ajustar la construcción del grafo o la generación de puntos de control en futuras iteraciones. Un refinamiento en estos elementos permitiría alinear mejor el diagnóstico automático con la realidad observada sobre el mapa y reducir la aparición de falsas violaciones de la condición.

A partir de esta base, el análisis puede centrarse en cuestiones de fondo: cómo se distribuye la demanda entre estaciones, qué capacidades se recomiendan y cuál es el nivel de utilización y coste asociado a la red obtenida.

6.3 DEMANDA ASIGNADA A LA RED

Una vez obtenida la configuración final de la red, el siguiente paso consiste en analizar cómo se distribuye la demanda potencial de hidrógeno entre las estaciones seleccionadas. Este punto es relevante porque permite pasar de una lectura puramente espacial de la solución a una lectura funcional: no basta con conocer cuántas hidrolíneas forman parte de la red o dónde se localizan, también resulta necesario identificar cuáles de ellas concentran una mayor parte de la demanda y cuáles desempeñan un papel más marginal, o de cobertura, dentro del sistema.

Los resultados muestran, en primer lugar, que la demanda asignada no se reparte de forma homogénea entre las 92 estaciones. Al contrario, la red presenta una marcada desigualdad interna, con un número reducido de hidrolíneas que concentran varias toneladas diarias de demanda y un conjunto mucho más amplio de estaciones con volúmenes asignados claramente inferiores a 1 t/día, incluyendo algunos casos extremos con demandas nulas.

Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)	Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)	Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)
urban_U27_356	3,83	4,00	inter_15	0,65	1,00	urban_U19_250	0,26	1,00
urban_U29_400	2,86	3,00	urban_U26_335	0,65	1,00	inter_61	0,24	1,00
urban_U49_715	5,03	6,00	urban_U33_456	1,14	2,00	inter_37	0,23	1,00
urban_U43_624	2,70	3,00	inter_68	1,11	2,00	urban_U30_427	0,22	1,00
inter_53	1,87	2,00	urban_U02_7	1,10	2,00	urban_U41_580	0,19	1,00
inter_54	1,87	2,00	inter_65	1,10	2,00	inter_71	0,17	1,00
inter_11	3,36	4,00	inter_45	0,60	1,00	urban_U18_231	0,17	1,00
inter_12	3,36	4,00	inter_18	1,04	2,00	urban_U06_75	0,17	1,00
inter_13	3,36	4,00	inter_52	0,57	1,00	inter_26	0,16	1,00
inter_43	1,00	1,00	urban_U13_188	0,56	1,00	inter_34	0,16	1,00
inter_14	1,78	2,00	urban_U20_260	0,55	1,00	urban_U10_152	0,15	1,00
urban_U37_527	1,78	2,00	inter_17	0,52	1,00	inter_57	0,15	1,00
inter_6	0,99	1,00	inter_22	0,52	1,00	urban_U22_292	0,13	1,00
inter_8	0,99	1,00	inter_29	0,52	1,00	urban_U21_285	0,10	1,00
urban_U38_556	0,94	1,00	urban_U01_3	0,51	1,00	inter_69	0,07	1,00
urban_U09_144	1,69	2,00	urban_U44_644	0,44	1,00	inter_21	0,06	1,00
urban_U04_38	0,93	1,00	inter_75	0,44	1,00	inter_60	0,05	1,00
urban_U16_208	0,93	1,00	inter_76	0,44	1,00	inter_58	0,01	1,00
urban_U47_674	0,91	1,00	urban_U07_79	0,41	1,00	inter_28	0,01	1,00
urban_U34_480	2,31	3,00	urban_U23_302	0,38	1,00	inter_31	0,01	1,00
urban_U08_124	0,81	1,00	inter_25	0,37	1,00	urban_U40_579	0,01	1,00
urban_U45_650	0,80	1,00	urban_U39_560	0,36	1,00	inter_55	0,01	1,00
inter_47	2,02	3,00	urban_U35_494	0,35	1,00	urban_U36_501	0,00	1,00
urban_U15_197	0,79	1,00	inter_4	0,34	1,00	inter_59	0,00	1,00
inter_67	0,78	1,00	urban_U46_669	0,34	1,00	urban_U24_310	0,00	1,00
inter_42	1,38	2,00	urban_U25_319	0,33	1,00	inter_51	0,00	1,00
inter_3	0,75	1,00	inter_39	0,31	1,00	urban_U05_62	0,00	1,00
inter_40	1,31	2,00	urban_U42_602	0,29	1,00	urban_U12_174	0,00	1,00
urban_U28_373	0,73	1,00	inter_0	0,29	1,00	urban_U17_228	0,00	1,00
inter_41	1,28	2,00	urban_U03_35	0,28	1,00	urban_U31_440	0,00	1,00
urban_U48_705	1,21	2,00	urban_U11_169	0,28	1,00			

Ilustración 10: Detalle de demanda y capacidad nominal por hidrolinera final seleccionada

Esta diferencia es coherente con la propia estructura del sistema de transporte: los grandes nodos urbanos y logísticos, así como los corredores con mayor intensidad de flujos, tienden a concentrar un número superior de repostajes potenciales, mientras que las estaciones situadas en tramos intermedios o de menor centralidad cumplen sobre todo una función de continuidad territorial.

En este punto resulta útil distinguir entre las estaciones situadas en nodos urbanos obligatorios y las estaciones puramente interurbanas. Las primeras vienen forzadas por la propia redacción de AFIR, que exige disponer de puntos de suministro en determinados núcleos, incluso cuando el nivel actual de tráfico pesado en su entorno es muy reducido. De hecho, en el escenario base aparecen varios nodos urbanos con demandas asignadas cercanas a cero, lo que implica que, aun cumpliendo formalmente la norma, la hidrolinera prevista en esos núcleos tendría muy poca utilización en las condiciones actuales. Desde un punto de vista económico, estos casos plantean una cuestión

relevante: hasta qué punto tiene sentido sostener estaciones obligatorias en nodos urbanos con demanda prácticamente nula, más allá de su función de conectividad territorial. Las estaciones interurbanas, en cambio, son resultado directo del modelo de optimización y tienden a concentrarse allí donde la lógica conjunta de cobertura de corredor y captación de demanda lo considera más eficiente, lo que normalmente se traduce en volúmenes de hidrógeno más elevados en los tramos interurbanos con mayor intensidad de flujos.

En este contexto, resulta especialmente llamativo el pequeño grupo de estaciones que presentan demandas asignadas prácticamente nulas. Lejos de ser un artefacto indeseado, estas hidrolíneas se localizan en segmentos de muy baja densidad de tráfico donde su razón de ser es estrictamente territorial: permiten cerrar huecos en la cobertura y respetar el criterio de separación máxima entre puntos de suministro, incluso cuando el volumen actual de repostajes potenciales en su entorno es casi inexistente.

Desde el punto de vista del modelo, esto no implica necesariamente un fallo de la solución, sino una consecuencia esperable de trabajar con una red que debe responder al mismo tiempo a criterios de cobertura y a criterios de captación de demanda.

En otras palabras, no todas las estaciones están llamadas a desempeñar el mismo papel: unas funcionan como puntos de atracción de demanda y otras como piezas de cierre de la red.

Esta cuestión conecta directamente con el tamaño mínimo de las estaciones. La propia AFIR establece que las hidrolíneas deben diseñarse, en su configuración estándar, para una capacidad diaria mínima de 1 t/día, pero permite reducir dicha capacidad a 500 kg/día en los tramos donde el tráfico medio diario de vehículos pesados no supera las 2.000 unidades, siempre que se mantengan los objetivos de distancia y presión y que la reducción se justifique mediante un análisis socioeconómico coste-beneficio.

Esto significa que, al menos sobre el papel, algunas de las estaciones con demanda asignada muy baja podrían optar a capacidades menores que la estándar sin incumplir el marco regulatorio, siempre que se demostrase que un tamaño reducido es suficiente para atender la demanda esperada.

En el presente trabajo, sin embargo, se ha optado deliberadamente por no incorporar esta flexibilidad en el escenario base, por varios motivos. En primer lugar, el objetivo es evaluar el coste y la utilización de una red que cumple las exigencias de AFIR en su versión más exigente, de modo que los resultados reflejen el impacto económico de aplicar estrictamente la norma en los corredores

españoles, sin suavizar las obligaciones en función de la demanda local. En segundo lugar, el modelo trabaja con una caracterización agregada de la demanda de transporte pesado y no con mediciones directas de tráfico por tramo que permitan identificar con precisión los segmentos que quedarían por debajo del umbral de 2.000 vehículos pesados/día, lo que dificultaría justificar caso por caso una reducción de capacidad sin introducir un nivel de detalle que desborda el alcance del estudio. Por último, mantener una capacidad mínima homogénea simplifica la comparación entre escenarios de distancia máxima y facilita interpretar las variaciones de coste como efecto de la estructura espacial y de la utilización, sin mezclar cambios normativos en la capacidad.

No obstante, para evitar que esta hipótesis rígida de 1 t/día oculte alternativas relevantes, se ha analizado la sensibilidad del modelo a la capacidad nominal mínima de las estaciones mediante escenarios adicionales en los que las hidrolíneas de baja demanda adopten capacidades inferiores, manteniendo inalterados los criterios de localización y cobertura.

Estos ejercicios muestran cómo la reducción del tamaño mínimo en estaciones de muy baja utilización puede mitigar parte de los costes unitarios extremos identificados, aunque no altera la conclusión central del análisis: la presencia de un grupo de estaciones de cobertura con demanda casi nula refleja una tensión estructural entre los objetivos de conectividad espacial y la viabilidad económica del despliegue.

Volviendo al análisis, el resultado más interesante de este apartado es precisamente esa asimetría. Si la red se hubiera configurado únicamente a partir de la intensidad de la demanda, cabría esperar una concentración mucho mayor de estaciones en torno a los principales corredores y nodos logísticos, dejando en segundo plano los tramos menos dinámicos. Sin embargo, al incorporar la lógica de cobertura espacial, el modelo introduce también estaciones cuya contribución a la demanda total es más modesta, pero que permiten evitar discontinuidades en el repostaje.

Desde una perspectiva territorial, este reparto desigual de la demanda ayuda a interpretar mejor el mapa de la red. La proximidad de una estación a un gran nodo urbano o a un corredor especialmente cargado de flujos se traduce, por lo general, en una mayor demanda potencial de hidrógeno asignada; por el contrario, en corredores con menor intensidad o en estaciones insertadas principalmente para garantizar continuidad, la demanda asociada es sustancialmente menor. La red, por tanto, no solo presenta heterogeneidad en su distribución espacial, sino también en la intensidad de uso potencial de cada uno de sus nodos.

Esta cuestión es importante porque condiciona directamente los resultados de los apartados siguientes. La demanda asignada es la variable de partida para el dimensionamiento de la capacidad, y de ella depende también la utilización esperada de cada hidrolinera. Por eso, el análisis de la demanda asignada no debe entenderse como un resultado aislado, sino como la base que explica después buena parte de la heterogeneidad observada en la red.

En conjunto, la solución obtenida no dibuja una red de estaciones equivalentes, sino una red claramente jerarquizada, en la que coexisten hidrolineras con un papel central en términos de captación de demanda y otras cuya función principal es garantizar la continuidad territorial del repostaje. Esta estructura explica que la evaluación posterior de capacidad, utilización y coste no pueda basarse en un único valor medio, sino que deba abordarse de forma desagregada, estación por estación.

6.4 UTILIZACIÓN DE LAS ESTACIONES

Una vez estimada la demanda asignada y definida la capacidad nominal de cada hidrolinera, el siguiente paso consiste en analizar su grado de utilización.

Para cada estación se calcula el cociente entre la demanda diaria asignada y la capacidad instalada, expresado en porcentaje, y este valor se recoge de forma individual en la tabla de resultados. Esta variable permite valorar hasta qué punto el tamaño de cada estación se corresponde con el uso esperado dentro de la red final.

Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización	Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización	Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización
urban_U27_356	4,00	95,64%	inter_15	1,00	65,16%	urban_U19_250	1,00	26,05%
urban_U29_400	3,00	95,44%	urban_U26_335	1,00	64,68%	inter_61	1,00	23,72%
urban_U49_715	6,00	83,87%	urban_U33_456	2,00	56,78%	inter_37	1,00	22,77%
urban_U43_624	3,00	90,07%	inter_68	2,00	55,61%	urban_U30_427	1,00	21,66%
inter_53	2,00	93,55%	urban_U02_7	2,00	55,13%	urban_U41_580	1,00	18,96%
inter_54	2,00	93,55%	inter_65	2,00	54,79%	inter_71	1,00	17,30%
inter_11	4,00	84,09%	inter_45	1,00	59,92%	urban_U18_231	1,00	17,22%
inter_12	4,00	84,09%	inter_18	2,00	52,17%	urban_U06_75	1,00	16,89%
inter_13	4,00	84,09%	inter_52	1,00	56,63%	inter_26	1,00	16,30%
inter_43	1,00	99,76%	urban_U13_188	1,00	56,32%	inter_34	1,00	16,16%
inter_14	2,00	89,13%	urban_U20_260	1,00	55,32%	urban_U10_152	1,00	15,24%
urban_U37_527	2,00	88,91%	inter_17	1,00	52,41%	inter_57	1,00	15,11%
inter_6	1,00	98,56%	inter_22	1,00	52,13%	urban_U22_292	1,00	13,41%
inter_8	1,00	98,56%	inter_29	1,00	51,88%	urban_U21_285	1,00	10,16%
urban_U38_556	1,00	94,37%	urban_U01_3	1,00	50,83%	inter_69	1,00	7,26%
urban_U09_144	2,00	84,46%	urban_U44_644	1,00	44,29%	inter_21	1,00	6,30%
urban_U04_38	1,00	92,54%	inter_75	1,00	43,88%	inter_60	1,00	5,05%
urban_U16_208	1,00	92,54%	inter_76	1,00	43,88%	inter_58	1,00	1,36%
urban_U47_674	1,00	91,04%	urban_U07_79	1,00	40,62%	inter_28	1,00	0,77%
urban_U34_480	3,00	77,15%	urban_U23_302	1,00	37,90%	inter_31	1,00	0,68%
urban_U08_124	1,00	81,24%	inter_25	1,00	36,89%	urban_U40_579	1,00	0,68%
urban_U45_650	1,00	80,17%	urban_U39_560	1,00	35,74%	inter_55	1,00	0,55%
inter_47	3,00	67,40%	urban_U35_494	1,00	35,34%	urban_U36_501	1,00	0,39%
urban_U15_197	1,00	79,29%	inter_4	1,00	34,48%	inter_59	1,00	0,32%
inter_67	1,00	78,24%	urban_U46_669	1,00	34,34%	urban_U24_310	1,00	0,22%
inter_42	2,00	69,07%	urban_U25_319	1,00	33,41%	inter_51	1,00	0,00%
inter_3	1,00	74,59%	inter_39	1,00	31,15%	urban_U05_62	1,00	0,08%
inter_40	2,00	65,46%	urban_U42_602	1,00	29,45%	urban_U12_174	1,00	0,00%
urban_U28_373	1,00	72,63%	inter_0	1,00	28,60%	urban_U17_228	1,00	0,00%
inter_41	2,00	63,93%	urban_U03_35	1,00	28,47%	urban_U31_440	1,00	0,00%
urban_U48_705	2,00	60,68%	urban_U11_169	1,00	28,47%			

Ilustración 11: Detalle utilización por hidrolinera final seleccionada

En términos agregados, la utilización media de la red se sitúa en el 46,6%, un valor intermedio que refleja un aprovechamiento desigual de la infraestructura. Más allá de esa media, el rasgo más relevante es la fuerte dispersión de niveles de uso. En concreto, 26 de las 92 hidrolineras, es decir, el 28,3% del total, se sitúan en el intervalo 0-20% de utilización; a ellas se suman 16 estaciones en el tramo 20-40% y 17 adicionales entre el 40 y el 60%, de modo que una fracción significativa de la red permanece todavía por debajo de niveles de uso altos.

En el extremo opuesto, el grupo de estaciones con utilización elevada es más reducido. Solo 12 hidrolineras se sitúan entre el 60 y el 80%, y 21 alcanzan el intervalo 80-100%. Esto indica que la red está sostenida por un subconjunto de estaciones con un uso intenso, mientras que una parte apreciable desempeña un papel claramente secundario desde el punto de vista volumétrico.

La lectura de estos resultados encaja con lo observado en los apartados anteriores. La red final no se ha configurado únicamente para maximizar demanda, sino también para asegurar continuidad espacial sobre los corredores. Como consecuencia, aparecen muchas estaciones cuya función principal no es captar grandes volúmenes de hidrógeno, sino cerrar huecos de cobertura y evitar discontinuidades en la red. Desde esta perspectiva, las bajas utilizations no deben interpretarse automáticamente como un error del modelo, sino como una consecuencia lógica del compromiso entre eficiencia económica y cobertura territorial.

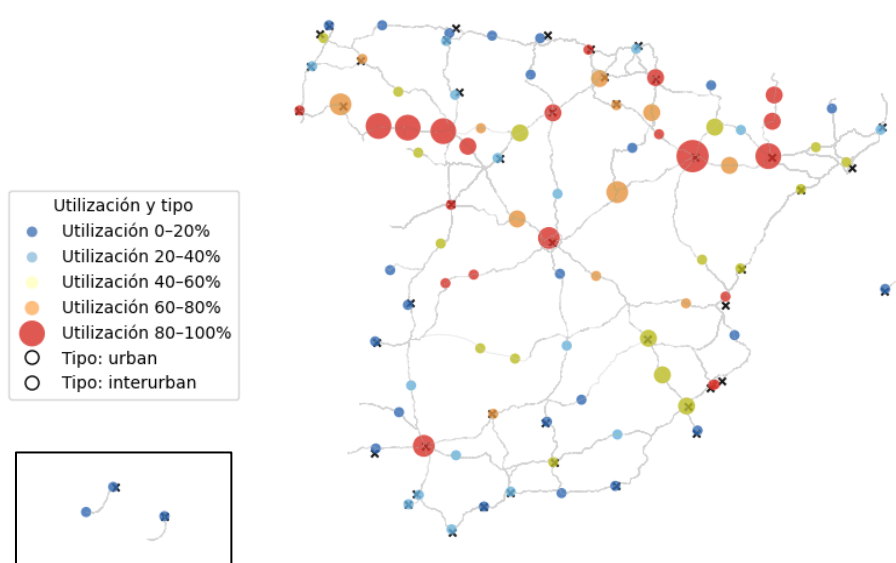


Ilustración 12: Mapa de calor de utilización de la red

La Figura 12 ayuda a visualizar bien esta situación. En ella, cada hidrolinera se representa mediante un círculo cuyo tamaño es proporcional a la capacidad instalada, mientras que el color refleja el intervalo de utilización al que pertenece, en tramos de 20 puntos porcentuales. Esta representación permite identificar de forma inmediata qué estaciones combinan capacidades altas con niveles de uso elevados y cuáles, por el contrario, aparecen con tamaños más reducidos y colores asociados a niveles bajos de utilización.

En términos espaciales, el mapa muestra un patrón bastante claro. Las estaciones con mayores niveles de utilización tienden a concentrarse en nodos más fuertes desde el punto de vista de la demanda y en corredores con mayor intensidad de flujo, mientras que las utilizations más bajas aparecen con más frecuencia en tramos donde la estación cumple sobre todo una función de cobertura.

El resultado es una red dual: por un lado, un subconjunto pequeño de hidrolineras con peso operativo alto; por otro, un grupo mucho más amplio de estaciones con un uso limitado, pero necesarias para sostener la continuidad del sistema.

Este comportamiento tiene una importancia directa para la interpretación económica de la red. Las estaciones más utilizadas parten con una posición más favorable para repartir sus costes fijos y alcanzar valores de coste por kilogramo más competitivos. En cambio, las hidrolineras que operan con utilidades bajas serán previsiblemente las más tensionadas desde el punto de vista del LCOH en estación. Por eso, la utilización no solo sirve para describir el funcionamiento de la red, sino también para anticipar buena parte de las diferencias de coste que se observan en el apartado siguiente.

6.5 RESULTADOS ECONÓMICO-OPERATIVOS

Una vez definida la red y analizado su grado de utilización, el siguiente paso es observar cómo se comporta en términos económicos.

Primeramente se ha observado que la inversión total requerida para el desarrollo de las 92 hidrolineras seleccionadas asciende a 219,6 M€, destinando 110,6 M€ a las 47 hidrolineras urbanas y 109,0 M€ a las 45 hidrolineras interurbanas.

Posteriormente, se ha calculado el coste nivelado del hidrógeno suministrado en cada hidrolinera, incorporando tanto el coste del propio hidrógeno como los costes asociados al sistema de compresión, almacenamiento y dispensación.

Esto permite comparar estaciones muy distintas entre sí bajo una misma referencia de coste por kilogramo servido.

Candidata	LCOH (€/kg)	Candidata	LCOH (€/kg)	Candidata	LCOH (€/kg)
urban_U27_356	7,55	inter_15	8,00	urban_U19_250	9,50
urban_U29_400	7,58	urban_U26_335	8,01	inter_61	9,74
urban_U49_715	7,59	urban_U33_456	8,03	inter_37	9,86
urban_U43_624	7,61	inter_68	8,05	urban_U30_427	10,00
inter_53	7,63	urban_U02_7	8,06	urban_U41_580	10,43
inter_54	7,63	inter_65	8,07	inter_71	10,76
inter_11	7,63	inter_45	8,09	urban_U18_231	10,78
inter_12	7,63	inter_18	8,12	urban_U06_75	10,85
inter_13	7,63	inter_52	8,15	inter_26	10,99
inter_43	7,65	urban_U13_188	8,15	inter_34	11,02
inter_14	7,66	urban_U20_260	8,18	urban_U10_152	11,27
urban_U37_527	7,66	inter_17	8,24	inter_57	11,30
inter_6	7,66	inter_22	8,25	urban_U22_292	11,85
inter_8	7,66	inter_29	8,25	urban_U21_285	13,40
urban_U38_556	7,69	urban_U01_3	8,28	inter_69	15,96
urban_U09_144	7,69	urban_U44_644	8,47	inter_21	17,32
urban_U04_38	7,70	inter_75	8,48	inter_60	19,89
urban_U16_208	7,70	inter_76	8,48	inter_58	54,80
urban_U47_674	7,71	urban_U07_79	8,60	inter_28	91,07
urban_U34_480	7,71	urban_U23_302	8,72	inter_31	102,09
urban_U08_124	7,80	inter_25	8,76	urban_U40_579	102,61
urban_U45_650	7,81	urban_U39_560	8,82	inter_55	125,36
inter_47	7,82	urban_U35_494	8,84	urban_U36_501	174,21
urban_U15_197	7,82	inter_4	8,89	inter_59	207,58
inter_67	7,83	urban_U46_669	8,89	urban_U24_310	304,39
inter_42	7,85	urban_U25_319	8,95	inter_51	657,23
inter_3	7,87	inter_39	9,09	urban_U05_62	657,23
inter_40	7,90	urban_U42_602	9,21	urban_U12_174	657,23
urban_U28_373	7,90	inter_0	9,27	urban_U17_228	657,23
inter_41	7,92	urban_U03_35	9,28	urban_U31_440	657,23
urban_U48_705	7,97	urban_U11_169	9,28		

Ilustración 13: Detalle del LCOH en estación por hidrolinera final seleccionada

Los resultados muestran que el LCOH en estación por estación no es idéntico en toda la red y, de hecho, presenta una dispersión considerable. En las hidrolineras con mayor utilización, el coste total se sitúa aproximadamente en el intervalo 7,5-7,9 €/kg, mientras que en un segundo grupo de estaciones con utilidades medias aparece un abanico de valores en torno a 8-9 €/kg. En el extremo inferior de la demanda, donde los volúmenes dispensados son casi residuales, su valor puede superar con facilidad los 10 €/kg e incluso alcanzar cifras mucho más elevadas, reflejando el peso desproporcionado que adquieren los costes fijos en esos casos.

Esta estructura se entiende bastante bien si se tiene en cuenta que hay una parte del coste común a todas las estaciones, el coste del hidrógeno de suministro, fijado en 6 €/kg, y el componente variable de distribución, de 1 €/kg; mientras que la diferencia entre unas y otras viene sobre todo de la parte fija que cada estación tiene que repercutir sobre el volumen realmente dispensado.

Ahí es donde la utilización pasa a ser clave. Una estación que mueve más hidrógeno puede repartir mejor sus costes fijos y, por tanto, reducir su coste unitario; en cambio, cuando el volumen servido es bajo, esa misma estructura de costes pesa mucho más sobre cada kilogramo. Por eso, aunque la red esté formada por 92 hidrolineras, no todas parten de la misma situación económica ni ofrecen el mismo comportamiento desde el punto de vista del coste final.

Esto encaja bastante bien con lo visto en el apartado anterior, donde la utilización media de la red se sitúa en el 46,6%. Con una estructura así, es lógico que una parte importante de la red presente una posición económica más débil que las estaciones con mayor carga operativa.

También resulta interesante que las estaciones con mayor capacidad no sean necesariamente las que presentan peores resultados económicos. En la salida del modelo aparecen estaciones de 4, 5 o incluso 6 t/día con niveles de utilización altos y costes unitarios relativamente contenidos, en el entorno de 7,5-7,9 €/kg. Esto sugiere que el tamaño de la instalación no penaliza por sí mismo; lo que realmente condiciona el resultado es si esa capacidad encuentra suficiente demanda como para ser aprovechada de forma razonable.

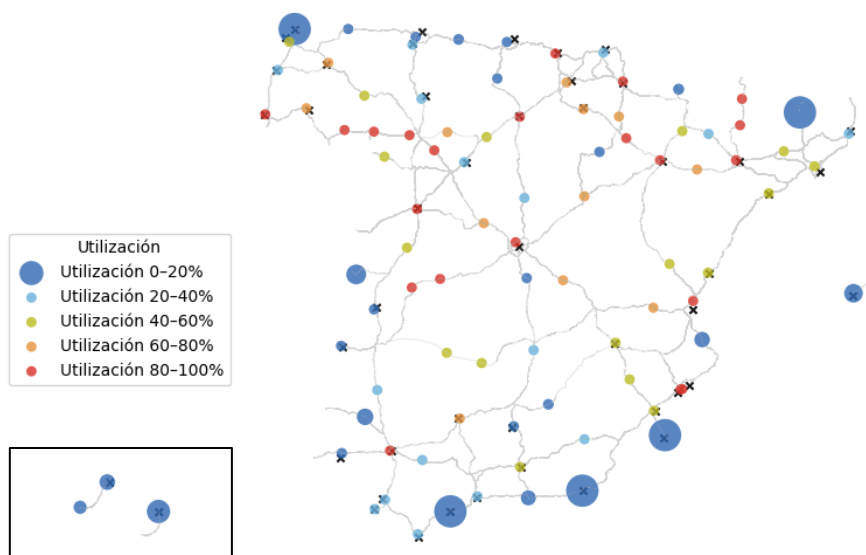


Ilustración 14: Mapa de calor LCOH vs utilización hidrolineras seleccionadas

En el lado contrario quedan las estaciones con menor utilización, que previsiblemente serán también las más tensionadas en términos de coste. No significa necesariamente que estén mal ubicadas. En muchos casos, su papel dentro de la red parece responder más a una función de cobertura que a una lógica estrictamente económica, y precisamente por estar asociadas a demandas muy bajas el LCOH

en estación que resulta de repercutir sus costes fijos sobre los pocos kilogramos dispensados puede alcanzar valores muy elevados, muy por encima de los niveles observados en las estaciones más cargadas.

Dicho de otra forma, son estaciones que quizá no destacan por el volumen que mueven ni por su coste unitario, sino todo lo contrario: en los casos más extremos, el coste por kilogramo puede alcanzar valores claramente desproporcionados, que hacen difícil justificar su operación desde un punto de vista estrictamente económico.

Una cosa es favorecer la conectividad y garantizar que ningún corredor quede sin cobertura, y otra muy distinta asumir que esa continuidad de la red deba sostenerse a cualquier precio; justamente por eso, estas estaciones de muy baja demanda ponen de relieve la tensión entre las exigencias de cobertura espacial y la necesidad de evitar costes unitarios prohibitivos, y sugieren que su despliegue debería abordarse con cautela.

Conviene, no obstante, recordar que el coste nivelado calculado en el modelo tiene carácter nodal y no implica necesariamente que el precio cobrado al usuario deba coincidir con ese valor en cada estación: en la práctica, los operadores pueden gestionar la red como un portafolio, compensando los mayores costes de ciertas hidrolíneas de cobertura con los menores costes de estaciones de alta utilización, de modo que el precio final del hidrógeno refleje una media ponderada más estable y competitiva.

En conjunto, los resultados económico-operativos dejan una idea bastante clara. La viabilidad de la red no depende solo del número de estaciones ni de su localización, sino del equilibrio entre cobertura, utilización y coste. Hay una parte de la red que parece defenderse razonablemente bien desde el punto de vista económico, asociada a estaciones más utilizadas y con LCOH en estación moderados, y otra que queda en una situación más frágil y cuya justificación se apoya más en su valor estratégico dentro del sistema que en su rendimiento inmediato.

6.6 SENSIBILIDADES AL CRITERIO AFIR

Con el fin de evaluar hasta qué punto la configuración final de la red depende del criterio de separación máxima entre hidrolíneas, se realizó un análisis de sensibilidad sobre la distancia permitida por AFIR.

En concreto, se compararon tres escenarios: uno más restrictivo, con una distancia máxima de 150 km; el escenario base, fijado en 200 km; y un escenario más laxo, con una separación máxima de 250 km. Este ejercicio permite comprobar cómo cambia la solución cuando se endurece o se relaja la exigencia de continuidad espacial del repostaje.

Los resultados muestran que este parámetro tiene una influencia directa sobre la forma final de la red. Cuando la distancia máxima permitida se reduce a 150 km, el modelo necesita incorporar un mayor número de estaciones para mantener la continuidad del servicio a lo largo de los corredores. En cambio, cuando el umbral se amplía a 250 km, la red puede resolverse con menos emplazamientos, ya que aumenta el margen admisible entre puntos de repostaje. El escenario de 200 km queda, en este sentido, en una posición intermedia tanto en número de estaciones como en nivel de exigencia espacial.

A continuación, se comparten los mapas de red obtenidos bajo los dos escenarios alternativos, los resultados detallados (tablas de utilización, capacidad y LCOH en estación por estación) se comparten en los Anexos I y II.

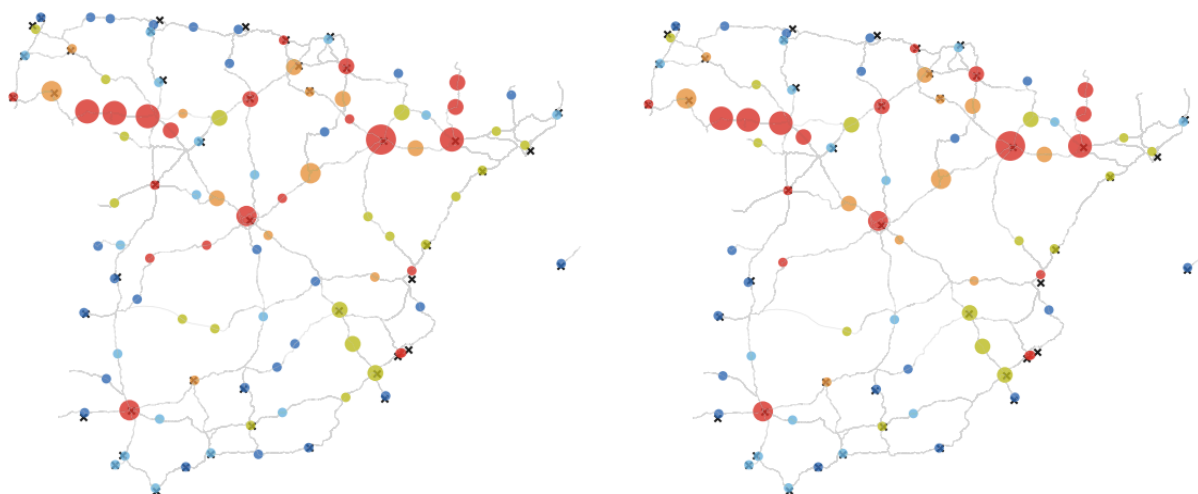


Ilustración 15: Mapas de calor sensibilidades 150km (izq.) y 250km (dch.)

Esta comparación pone de manifiesto un compromiso bastante claro entre cobertura y eficiencia. Los escenarios más restrictivos desde el punto de vista espacial tienden a producir redes más densas y con menor separación entre hidrolineras, pero esa misma densidad hace que la demanda total se reparta entre más estaciones y, por tanto, reduzca la utilización media de la red.

Por el contrario, cuando la restricción se relaja, la demanda se concentra en un número menor de emplazamientos, lo que suele traducirse en mayores niveles de utilización y en una estructura algo más eficiente desde el punto de vista operativo.

El efecto económico esperado va en la misma dirección. Una red más densa mejora la continuidad territorial y reduce el riesgo de tramos con cobertura más débil, pero también incorpora estaciones adicionales que no siempre captan suficiente demanda como para diluir sus costes fijos. En consecuencia, los escenarios más exigentes tienden a empeorar el comportamiento económico medio de la red o, al menos, a aumentar la diferencia entre estaciones muy utilizadas y estaciones con un papel principalmente territorial. En los escenarios más flexibles ocurre lo contrario: al concentrarse más la demanda, el sistema puede ganar eficiencia económica, aunque a costa de una menor densidad de cobertura.

Tabla 2: Resumen resultados sensibilidad de distancia máxima

	150km	200km	250km
Hidrolineras Urbanas	47	47	47
Hidrolineras Interurbanas	55	45	36
Inversión total	237,6 M€	219,6 M€	203,4 M€
Utilización	45,4%	46,6%	47,0%

La distribución del LCOH en estación conserva el mismo orden de magnitud en los tres escenarios, con un núcleo de estaciones entre 7,5 y 8,0 €/kg y un conjunto reducido de nodos con costes unitarios extremos o incluso nulos.

En conjunto, el análisis confirma que la distancia máxima permitida por AFIR es una de las variables más influyentes del modelo desde el punto de vista de planificación, ya que modifica el número de hidrolineras necesarias, su reparto territorial y su grado medio de utilización, mientras que el impacto sobre el orden de magnitud del LCOH en estación resulta mucho más limitado: los escenarios comparados muestran perfiles de coste muy parecidos en las estaciones bien utilizadas y diferencias relevantes solo en las estaciones más periféricas y con menor demanda.

No solo condiciona el número final de hidrolineras, sino también su distribución espacial, la proporción de estaciones con utilidades altas y bajas y, en consecuencia, su comportamiento

económico e inversión. Por ello, la elección de este parámetro no debería interpretarse como una cuestión puramente técnica o normativa, sino como una decisión con implicaciones directas sobre la viabilidad y la forma final de la red.

Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad sobre la capacidad mínima disponible para las estaciones. En el caso base se utilizaba el 1 t/día establecido por AFIR, pero para brindarle al estudio de una perspectiva adicional se modificó el valor para observar el resultado con una capacidad mínima disponible de 0,5 t/día y una regla de ajuste donde las capacidades nominales podían ajustarse de 0,5 en 0,5 t/día. El resultado ha sido el siguiente:

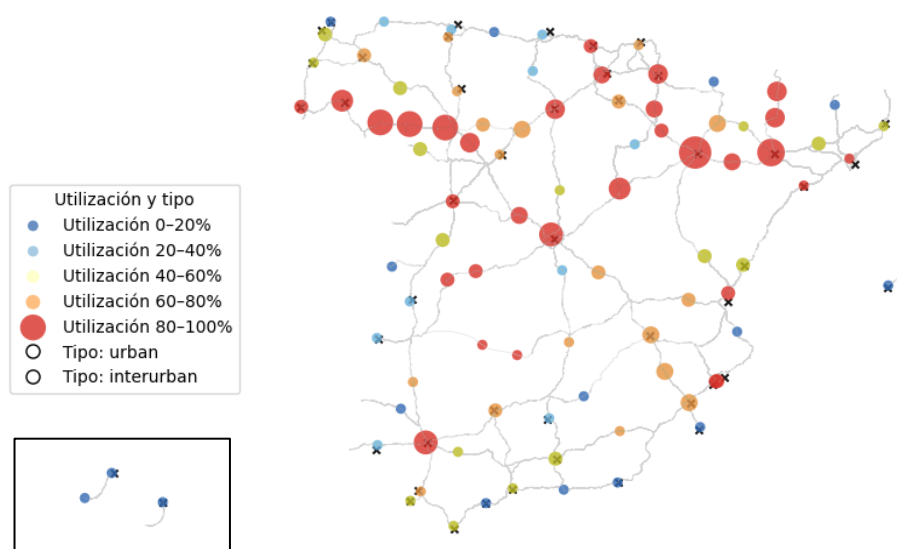


Ilustración 16: Mapa de calor capacidad vs utilización para la sensibilidad de capacidad mínima

Esta sensibilidad muestra como una discretización de las capacidades nominales más flexible permite mejorar los ratios de utilización de las hidrolineras objetivo. En este caso la utilización media alcanzada para las 92 hidrolineras (porque sigue siendo el caso base) es de 58,4%. No obstante, pese a que la mejora es significativa, sigue alejada de rangos de utilización óptimos dado que debemos recordar que sigue siendo un sector emergente y ciertas localizaciones tienen una demanda muy baja.

En este escenario, la inversión total necesaria se reduce a 172,6 M€ al ajustar mejor las capacidades nominales a la demanda real. No obstante, es importante recordar que estas condiciones de capacidades nominales sólo se pueden conseguir después de haber recibido la aprobación de la Comisión tras presentar una justificación socioeconómica relevante.

El resto de los resultados de este escenario se comparten en el Anexo III.

Capítulo 7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

7.1 *LECTURA INTEGRADA DE LA RED*

La red resultante combina 92 hidrolíneas, con un reparto casi simétrico entre estaciones urbanas (47) e interurbanas (45). En términos espaciales, la solución cubre de forma consistente los principales corredores TEN-T y genera una malla que, vista sobre el mapa, resulta continua y compatible con los patrones de transporte pesado del ámbito de estudio. Además, no aparece una red fragmentada, sino una estructura reconocible, apoyada en los grandes ejes y con conexiones razonables entre ellos.

Ahora bien, esa buena cobertura territorial no implica que todas las estaciones tengan el mismo peso. Los resultados apuntan claramente a una red jerárquica.

Un grupo reducido de hidrolíneas concentra una parte importante de la demanda y opera con niveles de utilización elevados, mientras que muchas otras se sitúan en tramos donde su función principal es garantizar que no haya huecos de cobertura. La red final se entiende mejor si se piensa como una combinación de “nodos de anclaje” y “piezas de cierre”, más que como un conjunto de estaciones equivalentes.

Es fundamental señalar que esta jerarquía tiene un componente administrativo ineludible: la obligatoriedad de los nodos urbanos. De las 92 estaciones, las 47 localizaciones urbanas (más de la mitad de la red total) actúan como una base fija de diseño que, en gran medida, explica la baja utilización media global. Como se desprende de los análisis de demanda, la mayoría de las estaciones con utilidades residuales se encuentran precisamente en estos nodos urbanos obligatorios, evidenciando que la designación administrativa no siempre se corresponde con un volumen de tráfico pesado que justifique operativamente su despliegue en esta fase inicial.

El dato de utilización media del 46,6% confirma que la continuidad espacial se consigue en buena medida a costa de mantener un número no despreciable de hidrolíneas con un uso reducido en el escenario base: alrededor de un 28% de las estaciones operan por debajo del 20% de utilización y una fracción importante se sitúa en rangos intermedios, entre el 20% y el 60%. Esto no parece tanto un problema puntual del modelo como una consecuencia de la situación actual, en la que se está diseñando una red que debe cubrir el territorio en un contexto de demanda todavía incipiente.

Por otro lado, el análisis de los 22 puntos de control que aparecen como violaciones del criterio AFIR matiza la percepción sobre la robustez espacial de la red. Al comprobarlos sobre el mapa, en todos los casos se identifican hidrolineras próximas, de modo que las discrepancias parecen estar más relacionadas con detalles de la representación del grafo y de la discretización que con vacíos reales de cobertura.

Esto refuerza la idea de que el principal desafío de la red obtenida no está tanto en “llegar a todos los sitios” como en conseguir que las estaciones existentes alcancen niveles de utilización compatibles con una buena viabilidad económico-operativa, reduciendo así el gradiente actual de LCOH en estación entre las hidrolineras más cargadas y aquellas cuya demanda es casi residual.

7.2 UTILIZACIÓN, DIMENSIONAMIENTO Y VIABILIDAD ECONÓMICA

Probablemente, el resultado más revelador del trabajo sea el nivel de utilización de la red. La media del 46,6% ya apunta a un aprovechamiento moderado de la infraestructura, pero el verdadero dato de fondo es la distribución: 26 de las 92 hidrolineras se sitúan en el intervalo 0–20% de utilización y una proporción importante se concentra en rangos intermedios, entre el 20% y el 60%.

Esto significa que la red obtenida es, en buena medida, una red preparada para existir antes que una red plenamente tensionada por la demanda.

Esta idea no debe interpretarse necesariamente en negativo. En una infraestructura emergente como la del hidrógeno para transporte pesado, sería poco realista esperar que una red de alcance nacional alcanzase desde el inicio niveles altos y homogéneos de utilización. Lo razonable es, más bien, que convivan unas pocas estaciones con un papel claramente tractor y un conjunto más amplio de emplazamientos con un uso limitado, pero necesarios para que la red tenga continuidad y resulte operativa a escala territorial.

Desde ese punto de vista, los resultados no reflejan tanto un sobredimensionamiento arbitrario como una cierta descoordinación temporal entre el despliegue de la infraestructura y la maduración de la demanda.

Aun así, conviene no rebajar demasiado la lectura crítica. Una red en la que cerca de un tercio de las estaciones quedan por debajo del 20% de utilización y muchas otras se sitúan en rangos intermedios

es una red exigente de sostener en términos estrictamente económicos. Aunque algunas hidrolíneas presentan niveles altos de uso y costes unitarios relativamente contenidos, una parte importante del sistema descansa sobre estaciones que, en el escenario base, dispensan poco hidrógeno y reparten sus costes fijos sobre volúmenes muy reducidos. En la práctica, esto sitúa a muchas de ellas en una posición frágil si se analizan con criterios de rentabilidad individual.

Aquí es donde el dimensionamiento cobra especial importancia. Los resultados sugieren que el problema no está únicamente en cuántas estaciones hay, sino en cómo se reparte la capacidad dentro de la red y en qué medida esa capacidad acompaña la demanda realmente atendida. En algunos nodos, el modelo parece ajustar razonablemente bien el tamaño de la estación al volumen previsto; en otros, la instalación queda inevitablemente infrautilizada porque su función principal no es maximizar ventas, sino garantizar cobertura. La consecuencia es una red donde conviven estaciones que pueden actuar como anclas operativas del sistema con otras cuyo valor es más estratégico que económico.

Este desequilibrio operativo se ve intensificado por la exigencia reglamentaria de un tamaño mínimo de 1 t/día. Los datos obtenidos en el análisis de sensibilidad demuestran que permitir capacidades más reducidas de 0,5 t/día en puntos de baja demanda elevaría la utilización media de la red del 46,6% al 58,4%, optimizando además la inversión total de 219,6 M€ a 172,6 M€. Esta diferencia de 47 millones de euros confirma que el estándar de 1 t/día resulta excesivo para la realidad de muchos tramos en España, forzando un sobredimensionamiento que penaliza el LCOH en ubicaciones con demandas asignadas prácticamente nulas.

Esto tiene una lectura bastante clara de cara a la implantación real. Si se pretendiera desplegar una red como la obtenida sin mecanismos de acompañamiento, buena parte de las estaciones partiría con una base operativa débil.

Por eso, los resultados apuntan a que el desarrollo de la infraestructura difícilmente puede descansar solo en señales de mercado a corto plazo. Harían falta, probablemente, esquemas de implantación por fases, apoyos a la inversión inicial o políticas de estímulo a la demanda que permitan que las estaciones de menor uso ganen volumen con el tiempo y no queden permanentemente en niveles de utilización residuales.

En ese sentido, la principal enseñanza del análisis no es solo que la utilización media sea moderada, sino que la viabilidad de la red depende de cómo se interprete ese dato. Si la red se juzga únicamente desde la rentabilidad inmediata de cada estación, el resultado parecerá débil. Si, en cambio, se

entiende como una red de primera implantación, diseñada para hacer posible la circulación de vehículos pesados de hidrógeno en todo el territorio, entonces los niveles de utilización observados resultan más comprensibles, aunque sigan planteando un reto económico evidente.

La cuestión de fondo no sería, por tanto, si la red está o no sobredimensionada, sino cuánto tiempo puede sostenerse una infraestructura de cobertura antes de que la demanda alcance la escala necesaria para consolidarla.

Más allá de la utilización, la capa económica ayuda a contextualizar la magnitud de los costes que implica operar la red obtenida. En el escenario base, las estaciones con mayor utilización se sitúan en un intervalo de LCOH en estación en torno a 7,5-8,0 €/kg (1,5-2 €/kg provenientes de la infraestructura), mientras que en las hidrolineras asociadas a demandas muy bajas su valor puede superar con facilidad los 10 €/kg (de los cuales 6 €/kg son de suministro exógeno) e incluso alcanzar valores mucho más elevados cuando la demanda es prácticamente nula.

Esta horquilla no debe interpretarse tanto como una predicción cerrada de precios, sino como un orden de magnitud razonable de lo que costaría, con las hipótesis adoptadas, poner hidrógeno a disposición del transporte pesado en una red que prioriza cobertura y robustez territorial sobre eficiencia económica individual. El hecho de que el núcleo de estaciones bien utilizadas se concentre en torno a 7,5-8,0 €/kg, mientras que un número reducido de nodos presenta costes unitarios extremos, refuerza la idea de que la evaluación económica no puede hacerse solo a partir de promedios, sino atendiendo a la posición específica de cada hidrolinera dentro de la red.

7.3 PAPEL DEL CRITERIO AFIR EN EL DISEÑO

El análisis de sensibilidad realizado sobre la distancia máxima permitida por AFIR confirma que este parámetro tiene un papel decisivo en la configuración final de la red. Al comparar los tres escenarios considerados (150 km, 200 km y 250 km) se observa que no se trata solo de una variación normativa, sino de un cambio que afecta de manera directa al número de estaciones necesarias, a su distribución espacial y, en último término, a su comportamiento operativo y económico.

La lógica de fondo es bastante clara. Cuando el umbral máximo de separación se reduce, la red se ve obligada a densificarse para evitar huecos entre puntos de repostaje. Esto hace que entren en la solución estaciones adicionales, muchas de ellas situadas en tramos intermedios donde su valor

principal es garantizar continuidad. Por el contrario, cuando la distancia permitida aumenta, la red puede resolverse con menos hidrolineras y con una mayor concentración de la demanda en un número más reducido de emplazamientos.

Desde el punto de vista espacial, AFIR no solo fija un criterio de cobertura, sino que también marca el grado de capilaridad de la red.

Lo relevante es que este cambio espacial arrastra también un efecto funcional. En el escenario más estricto de 150 km, el número de estaciones aumenta a 102 y la utilización media se sitúa en torno al 45,4%, mientras que en el escenario más laxo de 250 km la red se reduce a 83 estaciones y la utilización media asciende hasta aproximadamente el 47,0%. Aunque las diferencias no son enormes, reflejan que, a medida que la red incorpora más estaciones para cumplir un criterio más exigente, la demanda total tiende a repartirse entre más emplazamientos y la utilización media se modera ligeramente; cuando la red se concentra, aumenta la probabilidad de que las estaciones seleccionadas trabajen con niveles de uso algo más altos. Por eso, el criterio AFIR no solo condiciona la cobertura, sino también la eficiencia operativa del sistema.

Esta limitación de la eficiencia se hace evidente al contrastar el escenario base con los resultados de la sensibilidad de capacidad (0,5 t/día) analizados anteriormente. El hecho de que una mayor flexibilidad en el dimensionamiento, permitida por AFIR solo bajo justificaciones socioeconómicas específicas, mejore tan sustancialmente los indicadores de la red, demuestra que el estándar de 1 t/día actúa como una barrera para un despliegue racional en el contexto español.

Esto sugiere que el “sentido” del diseño actual de AFIR no responde a una lógica de optimización de activos, sino a una voluntad política de garantizar una infraestructura de gran escala desde el primer día, asumiendo conscientemente el riesgo de sobredimensionamiento en los tramos periféricos.

A esta condicionalidad se suma la obligación de instalar hidrolineras en todos los nodos urbanos sin distinguir su peso logístico real. Mientras que grandes núcleos atraen demandas considerables, otros nodos urbanos exigidos por la norma actúan como “puntos muertos” de demanda bajo las hipótesis actuales de flujo. Esto evidencia que AFIR prioriza la simetría administrativa sobre la eficiencia logística, obligando a distraer recursos de los corredores críticos para mantener infraestructura en núcleos donde el hidrógeno tardará mucho más en ser una solución competitiva para el transporte pesado.

Desde el punto de vista económico, los tres escenarios muestran perfiles de LCOH en estación muy similares en las estaciones con buena utilización: el núcleo de hidrolineras más cargadas se mantiene en torno a 7,5-8,0 €/kg, mientras que las diferencias se concentran en el comportamiento de las estaciones de baja demanda, donde la densificación o la concentración de la red puede desplazar el número de nodos con costes unitarios extremos.

A la vista de los resultados obtenidos, AFIR aparece menos como una condición externa y más como una decisión de diseño con consecuencias estructurales, tal y como se planteaba en el marco conceptual y se confirma ahora empíricamente.

Elegir una distancia máxima entre estaciones equivale, en la práctica, a decidir qué tipo de red se quiere construir: una red más densa y territorialmente robusta, aunque con una proporción mayor de estaciones de uso limitado, o una red más concentrada y eficiente, pero con menor capilaridad. En ese equilibrio está, probablemente, una de las cuestiones más delicadas de la planificación de infraestructuras de hidrógeno para transporte pesado.

7.4 PRINCIPALES CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

El análisis desarrollado permite extraer una primera conclusión clara: es posible articular una red de 92 hidrolineras que ofrece una cobertura amplia y coherente con los principales corredores de transporte pesado, combinando 47 estaciones urbanas y 45 interurbanas en una estructura que cubre de forma razonablemente continua el ámbito de estudio. La solución obtenida muestra que una red de alcance nacional, compatible con los requisitos de accesibilidad considerados, no es solo un objetivo deseable, sino una configuración técnicamente viable bajo las hipótesis de partida.

Ahora bien, la lectura conjunta de la utilización media, situada en torno al 46,6%, y de la distribución de la ocupación por tramos, con 26 de las 92 estaciones, el 28,3%, en el intervalo 0-20%, revela que esa viabilidad espacial se apoya en una red todavía poco tensionada por la demanda. En la práctica, la solución se asemeja más a una infraestructura de primera implantación, diseñada para garantizar cobertura y habilitar el uso del hidrógeno en el transporte pesado, que a una red madura optimizada desde criterios de rentabilidad individual de cada estación.

En resumen, los resultados permiten interpretar la red como una estructura jerárquica, en la que coexisten hidrolineras con alta utilización y capacidad tractora sobre la demanda junto con otras que

operan sobre todo como piezas de cierre territorial entre corredores. Esta jerarquía está fuertemente condicionada por el criterio de distancia máxima entre estaciones: umbrales más estrictos generan redes más densas y robustas, pero reparten la demanda entre más emplazamientos y reducen la utilización media; umbrales más laxos dan lugar a redes más concentradas y eficientes desde el punto de vista operativo, a costa de una menor capilaridad territorial.

De este modo, el estudio ofrece una referencia cuantitativa valiosa para calibrar el equilibrio entre cobertura y eficiencia cuando se traduzcan futuros objetivos normativos en redes concretas.

Finalmente, el comportamiento del LCOH en estación obtenido en el escenario base permite situar la red diseñada en términos de competitividad frente a otras tecnologías. En las estaciones con buena utilización, el coste energético del hidrógeno en surtidor se sitúa en torno a 7,5-8,0 €/kg, lo que, combinado con un consumo típico de 8-9 kg/100 km para un camión pesado de pila de combustible se traduce en un coste del orden de 0,60-0,68 €/km. En cambio, en las hidrolineras asociadas a demandas muy bajas el LCOH en estación puede superar ampliamente los 10 €/kg, reflejando el peso que adquieren los costes fijos cuando se reparten sobre volúmenes residuales.

En comparación, un camión diésel de larga distancia con consumos de 30-35 l/100 km y precios recientes del diésel en España se sitúa en el entorno de 0,42-0,49 €/km solo en combustible, mientras que los estudios de coste para camiones eléctricos a baterías apuntan a costes energéticos claramente inferiores, típicamente por debajo de 0,30 €/km cuando la electricidad se adquiere a precios de contrato competitivos. Esto sugiere que, con las hipótesis actuales, el hidrógeno para transporte pesado parte de una posición de clara desventaja en coste por kilómetro frente al camión eléctrico y también frente al diésel en la mayoría de los escenarios, de modo que su despliegue inicial solo parece razonable si se apoya en señales de precio adicionales sobre los combustibles fósiles y/o en mecanismos específicos de apoyo público.

En definitiva, el análisis realizado permite sugerir una revisión de los criterios de despliegue actuales hacia un modelo más flexible y basado en la realidad del transporte. La exigencia de una cobertura homogénea obliga a mantener una red donde casi un tercio de las estaciones (28,3%) operan con utilidades residuales, siendo los nodos urbanos obligatorios el principal motivo de esta ineficiencia. Del mismo modo, el requisito de un tamaño mínimo de 1 t/día carece de sentido económico en tramos de baja densidad, donde la infrautilización del activo dispara el LCOH por encima de los 10 €/kg. Por tanto, este trabajo demuestra que el valor de la normativa reside en la

creación de una red de primera implantación que puede llegar a necesitar apoyo para su funcionamiento durante las fases de baja utilización. El éxito de esta infraestructura no dependerá únicamente de la cobertura, sino de la capacidad de planificación y de agregación de la demanda en las localizaciones adecuadas para alcanzar las economías de escala necesarias.

Desde el punto de vista de los agentes implicados, la utilidad de esta radiografía es múltiple. Para las administraciones públicas, proporciona una base espacial y cuantitativa sobre la que priorizar corredores, nodos urbanos y fases de implantación, así como para diseñar instrumentos de apoyo allí donde la infraestructura resulte necesaria por motivos de cohesión territorial pero presente, en el corto plazo, niveles de utilización reducidos.

Para operadores y promotores privados, el mapa de estaciones tractoras frente a estaciones de baja demanda inicial funciona como una guía para identificar ubicaciones con mayor potencial comercial y para anticipar los riesgos asociados a determinados emplazamientos.

En términos más generales, el ejercicio contribuye a clarificar las expectativas sobre lo que puede y no puede pedirse a una red de hidrógeno en fase temprana. Los resultados apuntan a que, si se aspira a una cobertura amplia desde el inicio, será difícil evitar que una parte significativa de las estaciones opere durante un tiempo con utilidades bajas y costes unitarios elevados. En consecuencia, la cuestión relevante para la planificación no es solo dónde localizar las hidrolineras, sino también cómo acompañar el ritmo de despliegue, qué mecanismos permitirán sostener la infraestructura menos utilizada en los primeros años y qué papel se reserva a la política pública en ese proceso de maduración de la red.

7.5 LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Como todo ejercicio de optimización aplicada, los resultados obtenidos deben interpretarse a la luz de las hipótesis y simplificaciones adoptadas en el modelo. La solución propuesta constituye una representación consistente y útil del problema de localización de hidrolineras en la red viaria española, pero no pretende reproducir con total detalle la complejidad operativa, temporal y territorial de un despliegue real.

En este sentido, una primera limitación del estudio es su carácter estático: tanto la demanda como la configuración de la red se analizan para un escenario dado, sin modelizar explícitamente la evolución

temporal de la adopción del hidrógeno, la entrada progresiva de estaciones ni los cambios en los patrones logísticos a lo largo del tiempo.

Una segunda limitación se relaciona con la propia construcción espacial del problema. La red de candidatos y de puntos de control se genera a partir de una discretización de la cartografía TEN-T y de reglas geométricas definidas para operacionalizar el criterio AFIR, lo que permite formular y resolver el modelo de manera asequible, pero introduce inevitablemente una abstracción sobre la continuidad real de la red. Del mismo modo, la asociación entre demanda y estaciones se basa en radios de captura y parámetros medios de comportamiento, de modo que no recoge toda la heterogeneidad que podría existir entre corredores, operadores, tipos de mercancía o estrategias reales de repostaje.

También debe subrayarse que la capa económica, aunque detallada, descansa sobre valores de referencia y supuestos tecnológicos que pueden variar de forma significativa en los próximos años. Los costes del sistema de compresión, almacenamiento y dispensación, así como el precio del suministro, el factor de utilización y la intensidad efectiva de la demanda, condicionan de manera directa los resultados de LCOH en estación y la viabilidad relativa de cada emplazamiento. Por ello, los valores obtenidos no deben interpretarse como predicciones cerradas, sino como estimaciones consistentes dentro de un escenario base determinado, en el que las estaciones bien utilizadas se sitúan en torno a 7,5-8,0 €/kg y un número reducido de nodos de baja demanda presenta costes unitarios mucho más elevados.

A partir de estas limitaciones, se abren varias líneas futuras de investigación especialmente relevantes.

Una de las más claras consiste en extender el modelo hacia un enfoque dinámico o multi-período, capaz de representar el despliegue escalonado de la red y la maduración progresiva de la demanda. Este tipo de formulación permitiría analizar no solo dónde localizar las hidrolineras, sino también en qué secuencia temporal convendría implantarlas para equilibrar cobertura, inversión y utilización.

Otra línea prometedora sería enriquecer la representación de la demanda y del comportamiento de repostaje. La incorporación de matrices origen-destino más detalladas, tipologías diferenciadas de vehículos pesados, consideración de la orografía para el consumo de combustible, patrones reales de operación logística o probabilidades de parada dependientes del corredor permitiría aproximar mejor las condiciones reales de uso de la red.

Del mismo modo, podría resultar útil integrar restricciones adicionales vinculadas a disponibilidad eléctrica, acceso a suelo industrial, proximidad a producción renovable o conexión con hubs logísticos y portuarios.

Por último, una prolongación natural del trabajo sería ampliar su valor como herramienta de apoyo a la decisión para distintos agentes públicos y privados. La metodología desarrollada ya permite ofrecer una radiografía muy útil de la red potencial, identificando nodos tractores, estaciones de cierre territorial y compromisos entre cobertura y eficiencia. Futuras aplicaciones podrían convertir este enfoque en un instrumento todavía más operativo para priorizar inversiones, diseñar hojas de ruta por fases y evaluar escenarios regulatorios alternativos, tanto en España como en otros contextos europeos con requisitos similares de despliegue.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- Agnolucci, P., & McDowall, W. (2013). Designing future hydrogen infrastructure: Insights from analysis at different spatial scales. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(13), 5181-5191. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.109>
- Caparrós-Mancera, J. J., Estévez-García, J. A., & Romero-Pérez, J. A. (2021). Optimal location of hydrogen refueling stations in Spain: A network-based approach using TEN-T traffic data. *Energies*, 14(12), 3456. <https://doi.org/10.3390/en14123456>
- Caponi, R., Ferrario, A. M., Del Zotto, L., & Bocci, E. (2022). Design and costs analysis of hydrogen refuelling stations based on different hydrogen sources and production technologies. *Energies*, 15(2), 541. <https://doi.org/10.3390/en15020541>
- Cerniauskas, S., Grube, T., Praktiknjo, A., Stolten, D., & Robinius, M. (2020). Future hydrogen supply chain options: A German case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 30875-30890. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.213>
- Church, R., & ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, 32(1), 101-118. <https://doi.org/10.1007/BF01942293>
- Clean Hydrogen Observatory. (2025). Alternative Fuels Infrastructure Regulation: Hydrogen refuelling requirements. Clean Hydrogen Partnership.
- Comisión Europea. (2023). Reglamento (UE) 2023/1804 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de septiembre de 2023, relativo al despliegue de una infraestructura para los combustibles alternativos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 234. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32023R1804>
- Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. (2025). Circular 9/2025, de 22 de diciembre, por la que se establece la metodología de cálculo de la tasa de retribución financiera de las actividades de transporte y distribución de energía eléctrica, y regasificación, transporte y distribución de gas natural. *Boletín Oficial del Estado*.
- Copernicus Programme. (2022). Copernicus Digital Elevation Model (DEM) for Europe at 30 m resolution. *data.europa.eu*. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/9934>

- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269-271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Element Energy Ltd. (2019). Hydrogen Mobility Europe (H2ME): Final evaluation report. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), Project No. 671438. <https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/documents/H2ME%20Final%20Report.pdf>
- Eurostat. (2024). Maritime transport of goods - main EU ports. Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Maritime_transport_of_goods_-_main_EU_ports
- Eurostat. (2026). Cities and Functional Urban Areas (GISCO, Urban Audit / FUA datasets). <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/statistical-units/cities-functional-urban-areas>
- European Commission. (2023). Review of the CO₂ emission standards for heavy-duty vehicles. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2833/68296>
- Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. (2019). Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European energy transition. Publications Office of the European Union. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/publications/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition_en
- Gobierno de España. (2020). Estrategia de hidrógeno de España: Hidrógeno renovable para una España descarbonizada. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/estrategia_hidrogeno_espanol_tcm30-513876.pdf
- Gobierno de España. (2021). Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Gobierno de España. https://www.lamoncloa.gob.es/temas/fondos-recuperacion/Documents/30042021-Plan_Recuperacion.pdf
- Hakimi, S. L. (1964). Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3), 450-459. <https://doi.org/10.1287/opre.12.3.450>
- Honma, Y., & Kurita, O. (2008). A mathematical model on the optimal number of hydrogen stations with respect to the diffusion of fuel cell vehicles. *Forma*, 23(2), 75-86. https://www.jstage.jst.go.jp/article/forma/23/2/23_75/article

- Hydrogen Council, & McKinsey & Company. (2023). Hydrogen Insights 2023: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Hydrogen Council.
- ICEX - Invest in Spain. (2026). Transport and logistics industry in Spain. ICEX.
<https://www.investinspain.org/en/why-spain/infrastructures>
- IDAE. (2022). Programa H2 Pioneros: Ayudas para proyectos pioneros y singulares de hidrógeno renovable. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- International Council on Clean Transportation. (2022). Cost of renewable hydrogen produced onsite at hydrogen refueling stations in Europe. International Council on Clean Transportation.
<https://theicct.org/publication/fuels-eu-onsite-hydro-cost-feb22/>
- International Energy Agency. (2019). The future of hydrogen: Seizing today's opportunities (Report for the G20). International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- International Energy Agency. (2023). Global hydrogen review 2023. International Energy Agency.
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>
- IRENA - International Renewable Energy Agency. (2022). Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal. IRENA.
<https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Green-hydrogen-cost-reduction>
- Karp, R. M. (1972). Reducibility among combinatorial problems. In R. E. Miller & J. W. Thatcher (Eds.), Complexity of computer computations (pp. 85-103). Plenum Press.
- Kuby, M., & Lim, S. (2005). The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. Socio-Economic Planning Sciences, 39(2), 125-145. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2004.03.001>
- Lin, Z., Ogden, J., Fan, Y., & Chen, C. W. (2008). The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting. International Journal of Hydrogen Energy, 33(12), 3096-3101.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.03.012>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Hoja de ruta del hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable. MITERD.
https://www.miteco.gob.es/es/energia/temas/energia-renovable/hoja_ruta_hidrogeno_tcm30-513876.pdf
-

- Moreno-Benito, M., Agnolucci, P., & Papageorgiou, L. G. (2017). Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development. *Computers & Chemical Engineering*, 102, 110-127. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.12.006>
- Murray, A. T. (2016). Maximal coverage location problem. *International Regional Science Review*, 39(1), 5-27. <https://doi.org/10.1177/0160017614549134>
- National Renewable Energy Laboratory. (2023). Levelized cost of dispensed hydrogen for heavy-duty vehicles (NREL/TP-5400-88818). U.S. Department of Energy. <https://doi.org/10.2172/2322556>
- Nicholas, M. A., Ogden, J. M., & Yang, C. (2004). Driving towards a hydrogen future: Evaluating and deploying hydrogen infrastructure for California. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. https://itspubs.ucdavis.edu/download_pdf.php?id=46
- NREL - National Renewable Energy Laboratory. (2013). Hydrogen station cost estimates: Comparing Hydrogen Station Cost Calculator results with other recent estimates (NREL/TP-5400-56412). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56412.pdf>
- NREL - National Renewable Energy Laboratory. (2022). H2A: Hydrogen analysis production models - Forecourt production model v4.0. U.S. Department of Energy. <https://www.nrel.gov/hydrogen/h2a-production-analysis.html>
- Okonkwo, P. C. (2024). A case study on hydrogen refueling station techno-economic viability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 736-746. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.086>
- OMIE - Operador del Mercado Ibérico de Energía. (2024). Informe anual de mercado eléctrico 2023. OMIE. <https://www.omie.es/es/informe-anual>
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2013). Reglamento (UE) n.º 1315/2013 sobre las orientaciones de la Unión para el desarrollo de la red transeuropea de transporte. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32013R1315>

- Parlamento Europeo y Consejo. (2023). Directiva (UE) 2023/2413, de 18 de octubre de 2023, por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001, el Reglamento (UE) 2018/1999 y la Directiva 98/70/CE en lo que respecta a la promoción de la energía procedente de fuentes renovables (RED III). Diario Oficial de la Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32023L2413>
- Pérez-Bravo, M., Serna, S., Cossent, R., & Linares, P. (2026). Economies of scale matter: How refuelling infrastructure policy affects the viability of alternative fuel trucks. *Energy Policy*, 209, 114976. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.120000>
- ReVelle, C. S., & Swain, R. W. (1970). Central facilities location. *Geographical Analysis*, 2(1), 30-42. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1970.tb00142.x>
- Robinius, M., Otto, A., Heuser, P., Welder, L., Syranidis, K., Ryberg, D. S., Grube, T., Markewitz, P., Peters, R., & Stolten, D. (2017). Linking the power and transport sectors - Part 1: The importance of long-term based power dispatch for hydrogen production. *Energies*, 10(7), 957. <https://doi.org/10.3390/en10070957>
- SAE International. (2015). SAE J2600_201510: Compressed hydrogen surface vehicle fueling connection devices. https://doi.org/10.4271/J2600_201510
- SAE International. (2020). SAE J2601: Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles. SAE International.
- SAE International. (2024). SAE J2799_202406: Hydrogen surface vehicle to station communications hardware and software. SAE International.
- Saha, A. K., Rehme, S., & Sattler, C. (2023). A review of the optimization strategies and methods used to locate hydrogen fuel refuelling stations. *Energies*, 16(5), 2171. <https://doi.org/10.3390/en16052171>
- Samsatli, N. J., Samsatli, S., & Shah, N. (2016). Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(1), 447-475. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.062>

- Snyder, L. V. (2011). Introduction to facility location. In J. J. Cochran, L. A. Cox Jr., P. Keskinocak, J. P. Kharoufeh, & J. C. Smith (Eds.), Wiley encyclopedia of operations research and management science. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0423>
- Snyder, L. V. (2006). Facility location under uncertainty: A review. IIE Transactions, 38(7), 547–564. <https://coral.ise.lehigh.edu/larry/files/pubs/stochloc.pdf>
- UNE. (2018). UNE-EN 17124:2018. Hydrogen fuel - Product specification and quality assurance - Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles. Asociación Española de Normalización. (Ficha accesible en <https://www.une.org>)
- U.S. Department of Energy. (2021). DOE Hydrogen Program Record 21002: Hydrogen fueling stations cost. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. <https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/21002-hydrogen-fueling-station-cost.pdf>
- U.S. Department of Energy. (2022). Hydrogen Shot: 1 1 1 for 1 kg H₂ - Technical targets for liquid alkaline and PEM electrolyzers. DOE Hydrogen Program. (Ficha técnica disponible en <https://www.energy.gov/eere/fuelcells>)
- Wardrop, J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II, 1(36), 325-362.
- Wilson, G., Bryan, J., Cranston, K., Kitzes, J., Nederbragt, L., & Teal, T. (2017). Good enough practices in scientific computing. PLOS Computational Biology, 13(6), e1005510. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1005510>
- WorldData.info. (2023). Infrastructure and transportation in Spain. WorldData.info. <https://www.worlddata.info/europe/spain/infrastructure.php>
- ACEA. (2023). CO₂ standards for heavy-duty vehicles: Fact sheet. European Automobile Manufacturers' Association. <https://www.acea.auto/fact/fact-sheet-co2-standards-for-heavy-duty-vehicles/>
- ACEA. (2025). Vehicles on European roads 2025. European Automobile Manufacturers' Association. <https://www.acea.auto/publication/report-vehicles-on-european-roads-2025/>

- Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3), 423–447. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00086-6)
- Chung, M. (2024). Heavy-duty hydrogen fueling station corridors (SA187). National Renewable Energy Laboratory, DOE Hydrogen Program 2024 Annual Merit Review. https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/review24/sa187_chung_2024_o.pdf
- Ramsden, T., & Lipman, T. (2021). Cost of a potential hydrogen-refueling network for heavy-duty vehicles with long-haul application in Germany 2050. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://eta.lbl.gov/publications/cost-potential-hydrogen-refueling>
- Parlamento Europeo y Consejo. (2023). Directiva (UE) 2023/2413, de 18 de octubre de 2023, por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001, el Reglamento (UE) 2018/1999 y la Directiva 98/70/CE en lo que respecta a la promoción de la energía procedente de fuentes renovables (RED III). Diario Oficial de la Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32023L2413>
- International Energy Agency – Advanced Motor Fuels (IEA-AMF). (2023). Country report: Spain (Task report). IEA-AMF. https://iea-amf.org/content/publications/country_reports/spain
- Hagberg, A. A., Schult, D. A., & Swart, P. J. (2008). Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. In G. Varoquaux, T. Vaught, & J. Millman (Eds.), *Proceedings of the 7th Python in Science Conference (SciPy 2008)* (pp. 11-15). Pasadena, CA. <https://doi.org/10.25080/tcwg9851>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., van Mulbregt, P. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2025). Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera (Actualización a 31 de julio de 2025). Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-transportes/transporte-terrestre/actividades-servicios/observatorios-costes-transporte-mercancias-carretera/observatorio_documento_2025.pdf
-

Capítulo 9. ANEXOS

9.1 ANEXO I – RESULTADOS NUMÉRICOS ESCENARIO DE SENSIBILIDAD 150KM

Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)	Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)	Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)
urban_U27_356	3,83	4,00	urban_U33_456	1,14	2,00	urban_U19_250	0,26	1,00
urban_U29_400	2,86	3,00	inter_68	1,11	2,00	inter_61	0,24	1,00
urban_U49_715	5,03	6,00	urban_U02_7	1,10	2,00	inter_37	0,23	1,00
urban_U43_624	2,70	3,00	inter_65	1,10	2,00	urban_U30_427	0,22	1,00
inter_53	1,87	2,00	inter_45	0,60	1,00	urban_U41_580	0,19	1,00
inter_54	1,87	2,00	inter_35	0,59	1,00	inter_71	0,17	1,00
inter_11	3,36	4,00	inter_18	1,04	2,00	urban_U18_231	0,17	1,00
inter_12	3,36	4,00	inter_44	0,58	1,00	urban_U06_75	0,17	1,00
inter_13	3,36	4,00	inter_52	0,57	1,00	inter_26	0,16	1,00
inter_43	1,00	1,00	urban_U13_188	0,56	1,00	inter_34	0,16	1,00
inter_14	1,78	2,00	urban_U20_260	0,55	1,00	urban_U10_152	0,15	1,00
urban_U37_527	1,78	2,00	inter_17	0,52	1,00	inter_57	0,15	1,00
inter_6	0,99	1,00	inter_29	0,52	1,00	urban_U22_292	0,13	1,00
inter_7	0,99	1,00	urban_U01_3	0,51	1,00	urban_U21_285	0,10	1,00
inter_48	0,96	1,00	inter_20	0,51	1,00	inter_33	0,08	1,00
urban_U38_556	0,94	1,00	urban_U44_644	0,44	1,00	inter_69	0,07	1,00
urban_U09_144	1,69	2,00	inter_75	0,44	1,00	inter_70	0,07	1,00
urban_U04_38	0,93	1,00	inter_76	0,44	1,00	inter_9	0,07	1,00
urban_U16_208	0,93	1,00	inter_62	0,44	1,00	inter_21	0,06	1,00
urban_U47_674	0,91	1,00	urban_U07_79	0,41	1,00	inter_1	0,05	1,00
urban_U34_480	2,31	3,00	urban_U23_302	0,38	1,00	inter_60	0,05	1,00
urban_U08_124	0,81	1,00	inter_25	0,37	1,00	inter_58	0,01	1,00
urban_U45_650	0,80	1,00	urban_U39_560	0,36	1,00	inter_28	0,01	1,00
inter_47	2,02	3,00	urban_U35_494	0,35	1,00	inter_31	0,01	1,00
urban_U15_197	0,79	1,00	inter_4	0,34	1,00	urban_U40_579	0,01	1,00
inter_66	0,78	1,00	urban_U46_669	0,34	1,00	inter_55	0,01	1,00
inter_42	1,38	2,00	urban_U25_319	0,33	1,00	urban_U36_501	0,00	1,00
inter_3	0,75	1,00	inter_38	0,31	1,00	inter_59	0,00	1,00
inter_40	1,31	2,00	inter_23	0,31	1,00	urban_U24_310	0,00	1,00
urban_U28_373	0,73	1,00	urban_U42_602	0,29	1,00	inter_51	0,00	1,00
inter_41	1,28	2,00	inter_0	0,29	1,00	urban_U05_62	0,00	1,00
urban_U48_705	1,21	2,00	urban_U03_35	0,28	1,00	urban_U12_174	0,00	1,00
inter_15	0,65	1,00	urban_U11_169	0,28	1,00	urban_U17_228	0,00	1,00
urban_U26_335	0,65	1,00	inter_10	0,28	1,00	urban_U31_440	0,00	1,00

Ilustración 17: Detalle demanda y capacidad por estación (escenario sensibilidad 150km)

Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización	Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización	Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización
urban_U27_356	4,00	95,64%	urban_U33_456	2,00	56,78%	urban_U19_250	1,00	26,05%
urban_U29_400	3,00	95,44%	inter_68	2,00	55,61%	inter_61	1,00	23,72%
urban_U49_715	6,00	83,87%	urban_U02_7	2,00	55,13%	inter_37	1,00	22,77%
urban_U43_624	3,00	90,07%	inter_65	2,00	54,79%	urban_U30_427	1,00	21,66%
inter_53	2,00	93,55%	inter_45	1,00	59,92%	urban_U41_580	1,00	18,96%
inter_54	2,00	93,55%	inter_35	1,00	58,77%	inter_71	1,00	17,30%
inter_11	4,00	84,09%	inter_18	2,00	52,17%	urban_U18_231	1,00	17,22%
inter_12	4,00	84,09%	inter_44	1,00	57,67%	urban_U06_75	1,00	16,89%
inter_13	4,00	84,09%	inter_52	1,00	56,63%	inter_26	1,00	16,30%
inter_43	1,00	99,76%	urban_U13_188	1,00	56,32%	inter_34	1,00	16,16%
inter_14	2,00	89,13%	urban_U20_260	1,00	55,32%	urban_U10_152	1,00	15,24%
urban_U37_527	2,00	88,91%	inter_17	1,00	52,41%	inter_57	1,00	15,11%
inter_6	1,00	98,56%	inter_29	1,00	51,88%	urban_U22_292	1,00	13,41%
inter_7	1,00	98,56%	urban_U01_3	1,00	50,83%	urban_U21_285	1,00	10,16%
inter_48	1,00	96,46%	inter_20	1,00	50,66%	inter_33	1,00	8,08%
urban_U38_556	1,00	94,37%	urban_U44_644	1,00	44,29%	inter_69	1,00	7,26%
urban_U09_144	2,00	84,46%	inter_75	1,00	43,88%	inter_70	1,00	7,26%
urban_U04_38	1,00	92,54%	inter_76	1,00	43,88%	inter_9	1,00	6,98%
urban_U16_208	1,00	92,54%	inter_62	1,00	43,51%	inter_21	1,00	6,30%
urban_U47_674	1,00	91,04%	urban_U07_79	1,00	40,62%	inter_1	1,00	5,47%
urban_U34_480	3,00	77,15%	urban_U23_302	1,00	37,90%	inter_60	1,00	5,05%
urban_U08_124	1,00	81,24%	inter_25	1,00	36,89%	inter_58	1,00	1,36%
urban_U45_650	1,00	80,17%	urban_U39_560	1,00	35,74%	inter_28	1,00	0,77%
inter_47	3,00	67,40%	urban_U35_494	1,00	35,34%	inter_31	1,00	0,68%
urban_U15_197	1,00	79,29%	inter_4	1,00	34,48%	urban_U40_579	1,00	0,68%
inter_66	1,00	78,24%	urban_U46_669	1,00	34,34%	inter_55	1,00	0,55%
inter_42	2,00	69,07%	urban_U25_319	1,00	33,41%	urban_U36_501	1,00	0,39%
inter_3	1,00	74,59%	inter_38	1,00	31,15%	inter_59	1,00	0,32%
inter_40	2,00	65,46%	inter_23	1,00	30,64%	urban_U24_310	1,00	0,22%
urban_U28_373	1,00	72,63%	urban_U42_602	1,00	29,45%	inter_51	1,00	0,00%
inter_41	2,00	63,93%	inter_0	1,00	28,60%	urban_U05_62	1,00	0,08%
urban_U48_705	2,00	60,68%	urban_U03_35	1,00	28,47%	urban_U12_174	1,00	0,00%
inter_15	1,00	65,16%	urban_U11_169	1,00	28,47%	urban_U17_228	1,00	0,00%
urban_U26_335	1,00	64,68%	inter_10	1,00	27,65%	urban_U31_440	1,00	0,00%

Ilustración 18: Detalle utilización por estación (escenario sensibilidad 150km)

Candidata	LCOH (€/kg)	Candidata	LCOH (€/kg)	Candidata	LCOH (€/kg)
urban_U27_356	7,55	urban_U33_456	8,03	urban_U19_250	9,50
urban_U29_400	7,58	inter_68	8,05	inter_61	9,74
urban_U49_715	7,59	urban_U02_7	8,06	inter_37	9,86
urban_U43_624	7,61	inter_65	8,07	urban_U30_427	10,00
inter_53	7,63	inter_45	8,09	urban_U41_580	10,43
inter_54	7,63	inter_35	8,11	inter_71	10,76
inter_11	7,63	inter_18	8,12	urban_U18_231	10,78
inter_12	7,63	inter_44	8,13	urban_U06_75	10,85
inter_13	7,63	inter_52	8,15	inter_26	10,99
inter_43	7,65	urban_U13_188	8,15	inter_34	11,02
inter_14	7,66	urban_U20_260	8,18	urban_U10_152	11,27
urban_U37_527	7,66	inter_17	8,24	inter_57	11,30
inter_6	7,66	inter_29	8,25	urban_U22_292	11,85
inter_7	7,66	urban_U01_3	8,28	urban_U21_285	13,40
inter_48	7,67	inter_20	8,28	inter_33	15,05
urban_U38_556	7,69	urban_U44_644	8,47	inter_69	15,96
urban_U09_144	7,69	inter_75	8,48	inter_70	15,96
urban_U04_38	7,70	inter_76	8,48	inter_9	16,32
urban_U16_208	7,70	inter_62	8,49	inter_21	17,32
urban_U47_674	7,71	urban_U07_79	8,60	inter_1	18,89
urban_U34_480	7,71	urban_U23_302	8,72	inter_60	19,89
urban_U08_124	7,80	inter_25	8,76	inter_58	54,80
urban_U45_650	7,81	urban_U39_560	8,82	inter_28	91,07
inter_47	7,82	urban_U35_494	8,84	inter_31	102,09
urban_U15_197	7,82	inter_4	8,89	urban_U40_579	102,61
inter_66	7,83	urban_U46_669	8,89	inter_55	125,36
inter_42	7,85	urban_U25_319	8,95	urban_U36_501	174,21
inter_3	7,87	inter_38	9,09	inter_59	207,58
inter_40	7,90	inter_23	9,12	urban_U24_310	304,39
urban_U28_373	7,90	urban_U42_602	9,21	inter_51	657,23
inter_41	7,92	inter_0	9,27	urban_U05_62	657,23
urban_U48_705	7,97	urban_U03_35	9,28	urban_U12_174	657,23
inter_15	8,00	urban_U11_169	9,28	urban_U17_228	657,23
urban_U26_335	8,01	inter_10	9,35	urban_U31_440	657,23

Ilustración 19: Detalle LCOH en estación (escenario sensibilidad 150km)

9.2 ANEXO II – RESULTADOS NUMÉRICOS ESCENARIO SENSIBILIDAD 250KM

Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)	Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)	Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)
urban_U27_356	3,83	4,00	urban_U48_705	1,21	2,00	urban_U11_169	0,28	1,00
urban_U29_400	2,86	3,00	urban_U26_335	0,65	1,00	urban_U19_250	0,26	1,00
urban_U49_715	5,03	6,00	urban_U33_456	1,14	2,00	inter_61	0,24	1,00
urban_U43_624	2,70	3,00	inter_68	1,11	2,00	inter_37	0,23	1,00
inter_53	1,87	2,00	urban_U02_7	1,10	2,00	urban_U30_427	0,22	1,00
inter_54	1,87	2,00	inter_65	1,10	2,00	urban_U41_580	0,19	1,00
inter_11	3,36	4,00	inter_45	0,60	1,00	urban_U18_231	0,17	1,00
inter_12	3,36	4,00	inter_18	1,04	2,00	urban_U06_75	0,17	1,00
inter_13	3,36	4,00	inter_52	0,57	1,00	inter_26	0,16	1,00
inter_14	1,78	2,00	urban_U13_188	0,56	1,00	inter_34	0,16	1,00
urban_U37_527	1,78	2,00	urban_U20_260	0,55	1,00	urban_U10_152	0,15	1,00
inter_6	0,99	1,00	inter_16	0,52	1,00	inter_57	0,15	1,00
urban_U38_556	0,94	1,00	inter_29	0,52	1,00	urban_U22_292	0,13	1,00
urban_U09_144	1,69	2,00	urban_U01_3	0,51	1,00	urban_U21_285	0,10	1,00
urban_U04_38	0,93	1,00	urban_U44_644	0,44	1,00	inter_69	0,07	1,00
urban_U16_208	0,93	1,00	inter_75	0,44	1,00	inter_60	0,05	1,00
urban_U47_674	0,91	1,00	urban_U07_79	0,41	1,00	inter_58	0,01	1,00
urban_U34_480	2,31	3,00	urban_U23_302	0,38	1,00	inter_31	0,01	1,00
urban_U08_124	0,81	1,00	inter_25	0,37	1,00	urban_U40_579	0,01	1,00
urban_U45_650	0,80	1,00	urban_U39_560	0,36	1,00	inter_56	0,01	1,00
inter_47	2,02	3,00	urban_U35_494	0,35	1,00	urban_U36_501	0,00	1,00
urban_U15_197	0,79	1,00	inter_4	0,34	1,00	inter_59	0,00	1,00
inter_66	0,78	1,00	urban_U46_669	0,34	1,00	urban_U24_310	0,00	1,00
inter_42	1,38	2,00	urban_U25_319	0,33	1,00	urban_U05_62	0,00	1,00
inter_2	0,75	1,00	inter_38	0,31	1,00	urban_U12_174	0,00	1,00
inter_40	1,31	2,00	urban_U42_602	0,29	1,00	urban_U17_228	0,00	1,00
urban_U28_373	0,73	1,00	inter_0	0,29	1,00	urban_U31_440	0,00	1,00
inter_41	1,28	2,00	urban_U03_35	0,28	1,00			

Ilustración 20: Detalle demanda y capacidad por estación (escenario sensibilidad 250km)

Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización	Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización	Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización
urban_U27_356	4,00	95,64%	urban_U48_705	2,00	60,68%	urban_U11_169	1,00	28,47%
urban_U29_400	3,00	95,44%	urban_U26_335	1,00	64,68%	urban_U19_250	1,00	26,05%
urban_U49_715	6,00	83,87%	urban_U33_456	2,00	56,78%	inter_61	1,00	23,72%
urban_U43_624	3,00	90,07%	inter_68	2,00	55,61%	inter_37	1,00	22,77%
inter_53	2,00	93,55%	urban_U02_7	2,00	55,13%	urban_U30_427	1,00	21,66%
inter_54	2,00	93,55%	inter_65	2,00	54,79%	urban_U41_580	1,00	18,96%
inter_11	4,00	84,09%	inter_45	1,00	59,92%	urban_U18_231	1,00	17,22%
inter_12	4,00	84,09%	inter_18	2,00	52,17%	urban_U06_75	1,00	16,89%
inter_13	4,00	84,09%	inter_52	1,00	56,63%	inter_26	1,00	16,30%
inter_14	2,00	89,13%	urban_U13_188	1,00	56,32%	inter_34	1,00	16,16%
urban_U37_527	2,00	88,91%	urban_U20_260	1,00	55,32%	urban_U10_152	1,00	15,24%
inter_6	1,00	98,56%	inter_16	1,00	52,41%	inter_57	1,00	15,11%
urban_U38_556	1,00	94,37%	inter_29	1,00	51,88%	urban_U22_292	1,00	13,41%
urban_U09_144	2,00	84,46%	urban_U01_3	1,00	50,83%	urban_U21_285	1,00	10,16%
urban_U04_38	1,00	92,54%	urban_U44_644	1,00	44,29%	inter_69	1,00	7,26%
urban_U16_208	1,00	92,54%	inter_75	1,00	43,88%	inter_60	1,00	5,05%
urban_U47_674	1,00	91,04%	urban_U07_79	1,00	40,62%	inter_58	1,00	1,36%
urban_U34_480	3,00	77,15%	urban_U23_302	1,00	37,90%	inter_31	1,00	0,68%
urban_U08_124	1,00	81,24%	inter_25	1,00	36,89%	urban_U40_579	1,00	0,68%
urban_U45_650	1,00	80,17%	urban_U39_560	1,00	35,74%	inter_56	1,00	0,55%
inter_47	3,00	67,40%	urban_U35_494	1,00	35,34%	urban_U36_501	1,00	0,39%
urban_U15_197	1,00	79,29%	inter_4	1,00	34,48%	inter_59	1,00	0,32%
inter_66	1,00	78,24%	urban_U46_669	1,00	34,34%	urban_U24_310	1,00	0,22%
inter_42	2,00	69,07%	urban_U25_319	1,00	33,41%	urban_U05_62	1,00	0,08%
inter_2	1,00	74,59%	inter_38	1,00	31,15%	urban_U12_174	1,00	0,00%
inter_40	2,00	65,46%	urban_U42_602	1,00	29,45%	urban_U17_228	1,00	0,00%
urban_U28_373	1,00	72,63%	inter_0	1,00	28,60%	urban_U31_440	1,00	0,00%
inter_41	2,00	63,93%	urban_U03_35	1,00	28,47%			

Ilustración 21: Detalle utilización por estación (escenario sensibilidad 250km)

Candidata	LCOH (€/kg)	Candidata	LCOH (€/kg)	Candidata	LCOH (€/kg)
urban_U27_356	7,55	urban_U48_705	7,97	urban_U11_169	9,28
urban_U29_400	7,58	urban_U26_335	8,01	urban_U19_250	9,50
urban_U49_715	7,59	urban_U33_456	8,03	inter_61	9,74
urban_U43_624	7,61	inter_68	8,05	inter_37	9,86
inter_53	7,63	urban_U02_7	8,06	urban_U30_427	10,00
inter_54	7,63	inter_65	8,07	urban_U41_580	10,43
inter_11	7,63	inter_45	8,09	urban_U18_231	10,78
inter_12	7,63	inter_18	8,12	urban_U06_75	10,85
inter_13	7,63	inter_52	8,15	inter_26	10,99
inter_14	7,66	urban_U13_188	8,15	inter_34	11,02
urban_U37_527	7,66	urban_U20_260	8,18	urban_U10_152	11,27
inter_6	7,66	inter_16	8,24	inter_57	11,30
urban_U38_556	7,69	inter_29	8,25	urban_U22_292	11,85
urban_U09_144	7,69	urban_U01_3	8,28	urban_U21_285	13,40
urban_U04_38	7,70	urban_U44_644	8,47	inter_69	15,96
urban_U16_208	7,70	inter_75	8,48	inter_60	19,89
urban_U47_674	7,71	urban_U07_79	8,60	inter_58	54,80
urban_U34_480	7,71	urban_U23_302	8,72	inter_31	102,09
urban_U08_124	7,80	inter_25	8,76	urban_U40_579	102,61
urban_U45_650	7,81	urban_U39_560	8,82	inter_56	125,36
inter_47	7,82	urban_U35_494	8,84	urban_U36_501	174,21
urban_U15_197	7,82	inter_4	8,89	inter_59	207,58
inter_66	7,83	urban_U46_669	8,89	urban_U24_310	304,39
inter_42	7,85	urban_U25_319	8,95	urban_U05_62	657,23
inter_2	7,87	inter_38	9,09	urban_U12_174	657,23
inter_40	7,90	urban_U42_602	9,21	urban_U17_228	657,23
urban_U28_373	7,90	inter_0	9,27	urban_U31_440	657,23
inter_41	7,92	urban_U03_35	9,28		

Ilustración 22: Detalle LCOH en estación (escenario sensibilidad 250km)

9.3 ANEXO III – RESULTADOS NUMÉRICOS ESCENARIO SENSIBILIDAD

CAPACIDAD MÍNIMA DE 0,5 T/DÍA

Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)	Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)	Candidata	Demanda (ton/day)	Capacidad (ton/day)
urban_U49_715	5,03	5,50	inter_76	0,44	0,50	urban_U19_250	0,26	0,50
urban_U27_356	3,83	4,00	inter_68	1,11	1,50	inter_61	0,24	0,50
inter_11	3,36	3,50	inter_67	0,78	1,00	inter_37	0,23	0,50
inter_12	3,36	3,50	urban_U02_7	1,10	1,50	urban_U30_427	0,22	0,50
inter_13	3,36	3,50	inter_65	1,10	1,50	urban_U41_580	0,19	0,50
urban_U29_400	2,86	3,00	inter_3	0,75	1,00	inter_71	0,17	0,50
urban_U34_480	2,31	2,50	inter_18	1,04	1,50	urban_U18_231	0,17	0,50
urban_U43_624	2,70	3,00	urban_U07_79	0,41	0,50	urban_U06_75	0,17	0,50
inter_53	1,87	2,00	urban_U28_373	0,73	1,00	inter_26	0,16	0,50
inter_54	1,87	2,00	urban_U23_302	0,38	0,50	inter_34	0,16	0,50
inter_43	1,00	1,00	inter_25	0,37	0,50	urban_U10_152	0,15	0,50
inter_14	1,78	2,00	inter_15	0,65	1,00	inter_57	0,15	0,50
urban_U37_527	1,78	2,00	urban_U26_335	0,65	1,00	urban_U22_292	0,13	0,50
inter_6	0,99	1,00	urban_U39_560	0,36	0,50	urban_U21_285	0,10	0,50
inter_8	0,99	1,00	urban_U35_494	0,35	0,50	inter_69	0,07	0,50
inter_42	1,38	1,50	inter_4	0,34	0,50	inter_21	0,06	0,50
urban_U38_556	0,94	1,00	urban_U46_669	0,34	0,50	inter_60	0,05	0,50
urban_U09_144	1,69	2,00	urban_U25_319	0,33	0,50	inter_58	0,01	0,50
inter_47	2,02	2,50	inter_45	0,60	1,00	inter_28	0,01	0,50
inter_40	1,31	1,50	inter_52	0,57	1,00	inter_31	0,01	0,50
urban_U04_38	0,93	1,00	urban_U13_188	0,56	1,00	urban_U40_579	0,01	0,50
urban_U16_208	0,93	1,00	inter_39	0,31	0,50	inter_55	0,01	0,50
urban_U47_674	0,91	1,00	urban_U20_260	0,55	1,00	urban_U36_501	0,00	0,50
inter_41	1,28	1,50	urban_U42_602	0,29	0,50	inter_59	0,00	0,50
urban_U48_705	1,21	1,50	inter_17	0,52	1,00	urban_U24_310	0,00	0,50
urban_U08_124	0,81	1,00	inter_22	0,52	1,00	urban_U05_62	0,00	0,50
urban_U33_456	1,14	1,50	inter_29	0,52	1,00	inter_51	0,00	0,50
urban_U45_650	0,80	1,00	inter_0	0,29	0,50	urban_U12_174	0,00	0,50
urban_U44_644	0,44	0,50	urban_U03_35	0,28	0,50	urban_U17_228	0,00	0,50
urban_U15_197	0,79	1,00	urban_U11_169	0,28	0,50	urban_U31_440	0,00	0,50
inter_75	0,44	0,50	urban_U01_3	0,51	1,00			

Ilustración 23: Detalle demanda y capacidad por estación (escenario sensibilidad capacidad mínima)

Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización	Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización	Candidata	Capacidad (ton/day)	Utilización
urban_U49_715	5,50	91,49%	inter_76	0,50	87,76%	urban_U19_250	0,50	52,10%
urban_U27_356	4,00	95,64%	inter_68	1,50	74,15%	inter_61	0,50	47,44%
inter_11	3,50	96,10%	inter_67	1,00	78,24%	inter_37	0,50	45,53%
inter_12	3,50	96,10%	urban_U02_7	1,50	73,51%	urban_U30_427	0,50	43,32%
inter_13	3,50	96,10%	inter_65	1,50	73,05%	urban_U41_580	0,50	37,92%
urban_U29_400	3,00	95,44%	inter_3	1,00	74,59%	inter_71	0,50	34,59%
urban_U34_480	2,50	92,58%	inter_18	1,50	69,56%	urban_U18_231	0,50	34,44%
urban_U43_624	3,00	90,07%	urban_U07_79	0,50	81,24%	urban_U06_75	0,50	33,78%
inter_53	2,00	93,55%	urban_U28_373	1,00	72,63%	inter_26	0,50	32,61%
inter_54	2,00	93,55%	urban_U23_302	0,50	75,81%	inter_34	0,50	32,33%
inter_43	1,00	99,76%	inter_25	0,50	73,78%	urban_U10_152	0,50	30,48%
inter_14	2,00	89,13%	inter_15	1,00	65,16%	inter_57	0,50	30,22%
urban_U37_527	2,00	88,91%	urban_U26_335	1,00	64,68%	urban_U22_292	0,50	26,82%
inter_6	1,00	98,56%	urban_U39_560	0,50	71,48%	urban_U21_285	0,50	20,32%
inter_8	1,00	98,56%	urban_U35_494	0,50	70,68%	inter_69	0,50	14,52%
inter_42	1,50	92,10%	inter_4	0,50	68,95%	inter_21	0,50	12,60%
urban_U38_556	1,00	94,37%	urban_U46_669	0,50	68,69%	inter_60	0,50	10,09%
urban_U09_144	2,00	84,46%	urban_U25_319	0,50	66,82%	inter_58	0,50	2,72%
inter_47	2,50	80,89%	inter_45	1,00	59,92%	inter_28	0,50	1,55%
inter_40	1,50	87,28%	inter_52	1,00	56,63%	inter_31	0,50	1,37%
urban_U04_38	1,00	92,54%	urban_U13_188	1,00	56,32%	urban_U40_579	0,50	1,36%
urban_U16_208	1,00	92,54%	inter_39	0,50	62,29%	inter_55	0,50	1,10%
urban_U47_674	1,00	91,04%	urban_U20_260	1,00	55,32%	urban_U36_501	0,50	0,78%
inter_41	1,50	85,23%	urban_U42_602	0,50	58,91%	inter_59	0,50	0,65%
urban_U48_705	1,50	80,91%	inter_17	1,00	52,41%	urban_U24_310	0,50	0,44%
urban_U08_124	1,00	81,24%	inter_22	1,00	52,13%	urban_U05_62	0,50	0,16%
urban_U33_456	1,50	75,71%	inter_29	1,00	51,88%	inter_51	0,50	0,00%
urban_U45_650	1,00	80,17%	inter_0	0,50	57,20%	urban_U12_174	0,50	0,00%
urban_U44_644	0,50	88,57%	urban_U03_35	0,50	56,94%	urban_U17_228	0,50	0,00%
urban_U15_197	1,00	79,29%	urban_U11_169	0,50	56,94%	urban_U31_440	0,50	0,00%
inter_75	0,50	87,76%	urban_U01_3	1,00	50,83%			

Ilustración 24: Detalle utilización por estación (escenario sensibilidad capacidad mínima)

Candidata	LCOH (€/kg)	Candidata	LCOH (€/kg)	Candidata	LCOH (€/kg)
urban_U49_715	7,55	inter_76	7,82	urban_U19_250	8,38
urban_U27_356	7,55	inter_68	7,83	inter_61	8,52
inter_11	7,56	inter_67	7,83	inter_37	8,58
inter_12	7,56	urban_U02_7	7,83	urban_U30_427	8,67
inter_13	7,56	inter_65	7,84	urban_U41_580	8,90
urban_U29_400	7,58	inter_3	7,87	inter_71	9,09
urban_U34_480	7,61	inter_18	7,88	urban_U18_231	9,09
urban_U43_624	7,61	urban_U07_79	7,89	urban_U06_75	9,14
inter_53	7,63	urban_U28_373	7,90	inter_26	9,21
inter_54	7,63	urban_U23_302	7,95	inter_34	9,23
inter_43	7,65	inter_25	7,98	urban_U10_152	9,37
inter_14	7,66	inter_15	8,00	inter_57	9,39
urban_U37_527	7,66	urban_U26_335	8,01	urban_U22_292	9,69
inter_6	7,66	urban_U39_560	8,01	urban_U21_285	10,55
inter_8	7,66	urban_U35_494	8,02	inter_69	11,97
inter_42	7,66	inter_4	8,05	inter_21	12,73
urban_U38_556	7,69	urban_U46_669	8,05	inter_60	14,15
urban_U09_144	7,69	urban_U25_319	8,08	inter_58	33,52
inter_47	7,70	inter_45	8,09	inter_28	53,64
inter_40	7,70	inter_52	8,15	inter_31	59,75
urban_U04_38	7,70	urban_U13_188	8,15	urban_U40_579	60,04
urban_U16_208	7,70	inter_39	8,16	inter_55	72,67
urban_U47_674	7,71	urban_U20_260	8,18	urban_U36_501	99,77
inter_41	7,72	urban_U42_602	8,22	inter_59	118,28
urban_U48_705	7,76	inter_17	8,24	urban_U24_310	171,98
urban_U08_124	7,80	inter_22	8,25	urban_U05_62	451,82
urban_U33_456	7,81	inter_29	8,25	inter_51	728,48
urban_U45_650	7,81	inter_0	8,26	urban_U12_174	728,48
urban_U44_644	7,81	urban_U03_35	8,27	urban_U17_228	728,48
urban_U15_197	7,82	urban_U11_169	8,27	urban_U31_440	728,48
inter_75	7,82	urban_U01_3	8,28		

Ilustración 25: Detalle LCOH en estación (escenario sensibilidad capacidad mínima)

9.4 ANEXO IV – CÓDIGO PYTHON PARA EL TRATAMIENTO DE LA RED TEN-T Y PROYECCIÓN DE FLUJOS DE DEMANDA SOBRE LA MISMA

```
import os
import pandas as pd
import geopandas as gpd
import networkx as nx
import shapely
import matplotlib.pyplot as plt

from collections import defaultdict
from shapely import force_2d
from shapely.geometry import Point, LineString, MultiPoint
from shapely.ops import unary_union, split, snap, substring
from matplotlib import cm
from matplotlib.colors import ListedColormap

# 0 Parámetros

CRS_METRIC = 25830
CENTROID_SEARCH = 20000
PRECISION = 0

MAX_ENDPOINT_GAP = 2500
MAX_END_TO_LINE_GAP = 1500
POST_CENTROID_ENDPOINT_GAP = 150

SPLIT_TOL = 1
SNAP_TOL = 2
ROAD_ID_COL = "ID_TRAMO"
ROAD_ID_MAX_MATCH_DIST = 50

OUTPUT_DIR = "output"
os.makedirs(OUTPUT_DIR, exist_ok=True)

# 1 Cargar, pasar a 2D y limpiar

edges = gpd.read_file("TenT_Spain.gpkg", layer="carreteras").set_crs(CRS_METRIC)
edges.geometry = edges.geometry.apply(force_2d)
edges = edges.explode(index_parts=False).reset_index(drop=True)
edges = edges[edges.geometry.type == "LineString"].copy()
edges = edges[edges.geometry.length > 0].copy()

if ROAD_ID_COL in edges.columns and edges[ROAD_ID_COL].notna().any():
    edges["road_id"] = edges[ROAD_ID_COL].astype(str)
    print(f"Usando road_id original desde columna: {ROAD_ID_COL}")
else:
    edges["road_id"] = ["seg_" + str(i) for i in range(len(edges))]
```

```
print("No existe un ID de carretera usable; se crea road_id artificial por  
segmento original")

print("Segmentos originales:", len(edges))
print("¿Queda alguna geometría Z?:", edges.geometry.has_z.any())
print("Valores no nulos en road_id original:", edges["road_id"].notna().sum())

# 2 Funciones auxiliares

def node_from_xy(x, y, precision=0):
    return (round(x, precision), round(y, precision))

def node_from_point(pt, precision=0):
    return (round(pt.x, precision), round(pt.y, precision))

def rebuild_edge_fields(gdf, precision=0):
    gdf = gdf.copy()
    gdf["from_node"] = gdf.geometry.apply(
        lambda g: node_from_xy(g.coords[0][0], g.coords[0][1], precision)
    )
    gdf["to_node"] = gdf.geometry.apply(
        lambda g: node_from_xy(g.coords[-1][0], g.coords[-1][1], precision)
    )
    gdf["weight"] = gdf.geometry.length
    return gdf

def build_graph_from_edges(gdf):
    G = nx.Graph()
    for _, row in gdf.iterrows():
        if row["from_node"] != row["to_node"]:
            G.add_edge(row["from_node"], row["to_node"], weight=row["weight"])
    return G

def normalize_lines(geom):
    if geom is None or geom.is_empty:
        return []
    if geom.geom_type == "LineString":
        return [geom]
    elif geom.geom_type == "MultiLineString":
        return list(geom.geoms)
    elif geom.geom_type == "GeometryCollection":
        return [g for g in geom.geoms if g.geom_type == "LineString"]
    return []

def diagnose_graph(G, title):
    components = list(nx.connected_components(G))
    sizes = sorted([len(c) for c in components], reverse=True) if components
    else [0]

    print(f"\n--- {title} ---")
    print("Nodos:", G.number_of_nodes())
    print("Aristas:", G.number_of_edges())
```

```
print("Componentes:", len(components))
print("Mayor componente:", sizes[0] if sizes else 0)

if G.number_of_nodes() > 0 and sizes:
    print("Porcentaje componente principal:", sizes[0] /
G.number_of_nodes())
else:
    print("Porcentaje componente principal:", 0)

def node_and_split_network(lines_gdf, tol=1.0):
    geom = unary_union(list(lines_gdf.geometry))
    try:
        noded = shapely.node(geom)
    except Exception:
        noded = geom

    parts = normalize_lines(noded)
    out = gpd.GeoDataFrame(geometry=parts, crs=lines_gdf.crs)
    out = out[out.geometry.length > tol].copy()
    out = out.reset_index(drop=True)
    return out

def robust_split_line_at_point(line, point_on_line, split_tol=1.0,
snap_tol=2.0):
    if line.length <= split_tol:
        return [line]

    d = line.project(point_on_line)

    if d <= split_tol or d >= line.length - split_tol:
        return [line]

    snapped_line = snap(line, point_on_line, snap_tol)

    try:
        parts = split(snapped_line, point_on_line)
        lines = [g for g in parts.geoms if g.geom_type == "LineString" and
g.length > split_tol]
        if len(lines) == 2:
            return lines
    except Exception:
        pass

    try:
        part1 = substring(snapped_line, 0, d)
        part2 = substring(snapped_line, d, snapped_line.length)

        lines = []
        if part1.geom_type == "LineString" and part1.length > split_tol:
            lines.append(part1)
        if part2.geom_type == "LineString" and part2.length > split_tol:
            lines.append(part2)
```

```
        if len(lines) == 2:
            return lines
    except Exception:
        pass

    return [line]

def second_pass_connect_endpoints(edges_gdf, G, max_gap=50, precision=0):
    dangling_nodes = [n for n, deg in G.degree() if deg == 1]

    if not dangling_nodes:
        return edges_gdf, G, 0

    dangling_gdf = gpd.GeoDataFrame(
        {"node": dangling_nodes},
        geometry=[Point(n) for n in dangling_nodes],
        crs=edges_gdf.crs
    )

    sindex_post = dangling_gdf.sindex
    node_component_post = {
        n: i for i, comp in enumerate(nx.connected_components(G)) for n in comp
    }

    candidate_pairs = []

    for i, row in dangling_gdf.iterrows():
        geom_i = row.geometry
        idxs = list(sindex_post.query(geom_i.buffer(max_gap)))

        for j in idxs:
            if j <= i:
                continue

            row_j = dangling_gdf.iloc[j]
            geom_j = row_j.geometry
            dist = geom_i.distance(geom_j)

            if dist > max_gap:
                continue

            n1 = row["node"]
            n2 = row_j["node"]

            if n1 == n2:
                continue
            if node_component_post.get(n1) == node_component_post.get(n2):
                continue

            candidate_pairs.append((n1, n2, dist))

    best_for_node = {}
    for n1, n2, dist in candidate_pairs:
```

```
if (n1 not in best_for_node) or (dist < best_for_node[n1][1]):
    best_for_node[n1] = (n2, dist)
if (n2 not in best_for_node) or (dist < best_for_node[n2][1]):
    best_for_node[n2] = (n1, dist)

selected_pairs = {}
for n1, (n2, dist) in best_for_node.items():
    pair = tuple(sorted([n1, n2]))
    if pair not in selected_pairs or dist < selected_pairs[pair]:
        selected_pairs[pair] = dist

post_edges = []
for (n1, n2), dist in selected_pairs.items():
    if not G.has_edge(n1, n2):
        G.add_edge(n1, n2, weight=dist)
        post_edges.append({
            "geometry": LineString([n1, n2]),
            "from_node": n1,
            "to_node": n2,
            "weight": dist,
            "artificial": 1,
            "flow": 0.0,
            "road_id": None
        })

if post_edges:
    post_edges_gdf = gpd.GeoDataFrame(post_edges, geometry="geometry",
    crs=edges_gdf.crs)
    edges_gdf = pd.concat([edges_gdf, post_edges_gdf], ignore_index=True)

return edges_gdf, G, len(post_edges)

def plot_components_map(edges_gdf, G, output_path):
    components = list(nx.connected_components(G))
    node_component_map = {n: i for i, comp in enumerate(components) for n in comp}

    plot_gdf = edges_gdf.copy()
    plot_gdf["component_id"] = plot_gdf["from_node"].map(node_component_map)

    n_comp = max(len(components), 1)
    cmap_base = cm.get_cmap("tab20", n_comp)
    colors = [cmap_base(i % cmap_base.N) for i in range(n_comp)]
    component_cmap = ListedColormap(colors)

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 16))
    plot_gdf.plot(
        column="component_id",
        ax=ax,
        cmap=component_cmap,
        linewidth=0.8,
        categorical=True,
        legend=False
```

```
)

    ax.set_title("Red de carreteras TEN-T España por componentes conexas",
fontsize=15)
    ax.set_axis_off()
    plt.tight_layout()
    plt.savefig(output_path, dpi=300, bbox_inches="tight")
    plt.close(fig)

# 3 Red provisional para detectar extremos

edges_pre = rebuild_edge_fields(edges, PRECISION)
edges_pre["artificial"] = 0

G_pre = build_graph_from_edges(edges_pre)
diagnose_graph(G_pre, "Diagnóstico inicial (red original limpia)")

dangling_nodes = [n for n, deg in G_pre.degree() if deg == 1]
print("Extremos colgantes detectados en red provisional:", len(dangling_nodes))

dangling_gdf = gpd.GeoDataFrame(
    {"node": dangling_nodes},
    geometry=[Point(n) for n in dangling_nodes],
    crs=edges.crs
)

node_component_pre = {n: i for i, comp in
enumerate(nx.connected_components(G_pre)) for n in comp}

# 4 Conexiones extremo-extremo pre-planarización

candidate_pairs = []
if len(dangling_gdf) > 0:
    sindex_dangling = dangling_gdf.sindex

    for i, row in dangling_gdf.iterrows():
        geom_i = row.geometry
        idxs = list(sindex_dangling.query(geom_i.buffer(MAX_ENDPOINT_GAP)))

        for j in idxs:
            if j <= i:
                continue

            row_j = dangling_gdf.iloc[j]
            geom_j = row_j.geometry
            dist = geom_i.distance(geom_j)

            if dist <= MAX_ENDPOINT_GAP:
                n1 = row["node"]
                n2 = row_j["node"]
```

```
        if n1 == n2:
            continue
        if node_component_pre.get(n1) == node_component_pre.get(n2):
            continue

        candidate_pairs.append((n1, n2, dist))

best_connection = {}
for n1, n2, dist in candidate_pairs:
    if (n1 not in best_connection) or (dist < best_connection[n1][1]):
        best_connection[n1] = (n2, dist)
    if (n2 not in best_connection) or (dist < best_connection[n2][1]):
        best_connection[n2] = (n1, dist)

selected_pairs = {}
for n1, (n2, dist) in best_connection.items():
    pair = tuple(sorted([n1, n2]))
    if pair not in selected_pairs or dist < selected_pairs[pair]:
        selected_pairs[pair] = dist

artificial_rows_ext_ext = []
for (n1, n2), dist in selected_pairs.items():
    artificial_rows_ext_ext.append({
        "geometry": LineString([n1, n2]),
        "artificial": 1,
        "connector_type": "end_to_end_pre",
        "road_id": None
    })

artificial_edges_ext_ext = gpd.GeoDataFrame(
    artificial_rows_ext_ext, geometry="geometry", crs=edges.crs
) if artificial_rows_ext_ext else gpd.GeoDataFrame(
    columns=["geometry", "artificial", "connector_type", "road_id"],
    geometry="geometry", crs=edges.crs
)

print("Conexiones artificiales extremo-extremo pre-planarización:",
      len(artificial_edges_ext_ext))

# 5 Conexiones extremo-línea pre-planarización

edges_sindex = edges_pre.sindex
connectors_end_to_line = []

for _, drow in dangling_gdf.iterrows():
    node = drow["node"]
    pt = drow.geometry

    candidate_idx = list(edges_sindex.query(pt.buffer(MAX_END_TO_LINE_GAP)))
    if not candidate_idx:
        continue
```

```
candidate_edges = edges_pre.iloc[candidate_idx].copy()
candidate_edges = candidate_edges[
    (candidate_edges["from_node"] != node) & (candidate_edges["to_node"] !=
node)
].copy()

if candidate_edges.empty:
    continue

candidate_edges["dist"] = candidate_edges.geometry.distance(pt)
candidate_edges = candidate_edges[candidate_edges["dist"] <=
MAX_END_TO_LINE_GAP].copy()

if candidate_edges.empty:
    continue

nearest_idx = candidate_edges["dist"].idxmin()
nearest_edge = candidate_edges.loc[nearest_idx]
nearest_line = nearest_edge.geometry

proj_dist = nearest_line.project(pt)
projected = nearest_line.interpolate(proj_dist)

if Point(nearest_edge["from_node"]).distance(projected) <= SPLIT_TOL:
    continue
if Point(nearest_edge["to_node"]).distance(projected) <= SPLIT_TOL:
    continue

connector = LineString([pt, projected])
if connector.length <= SPLIT_TOL:
    continue

connectors_end_to_line.append({
    "geometry": connector,
    "artificial": 1,
    "connector_type": "end_to_line_pre",
    "road_id": None
})

artificial_edges_ext_line = gpd.GeoDataFrame(
    connectors_end_to_line, geometry="geometry", crs=edges.crs
) if connectors_end_to_line else gpd.GeoDataFrame(
    columns=["geometry", "artificial", "connector_type", "road_id"],
    geometry="geometry", crs=edges.crs
)

print("Conectores artificiales extremo-línea pre-planarización:",
len(artificial_edges_ext_line))

# 6 Planarizar / modificar red ampliada

edges["artificial"] = 0
```

```
edges["connector_type"] = "original"

network_full = pd.concat(
    [
        edges[["geometry", "artificial", "connector_type", "road_id"]],
        artificial_edges_ext_ext[["geometry", "artificial", "connector_type",
"road_id"]],
        artificial_edges_ext_line[["geometry", "artificial", "connector_type",
"road_id"]],
    ],
    ignore_index=True
)
network_full = gpd.GeoDataFrame(network_full, geometry="geometry",
crs=edges.crs)
network_full = network_full[network_full.geometry.notnull()].copy()
network_full = network_full[network_full.geometry.length > 0].copy()

print("Segmentos antes de planarizar red ampliada:", len(network_full))
print("\nPlanarizando red ampliada (noding)...")

edges_planar = node_and_split_network(network_full, tol=SPLIT_TOL)

all_artificial = pd.concat(
    [
        artificial_edges_ext_ext[["geometry"]],
        artificial_edges_ext_line[["geometry"]],
    ],
    ignore_index=True
)
all_artificial = gpd.GeoDataFrame(all_artificial, geometry="geometry",
crs=edges.crs)

if len(all_artificial) > 0:
    artificial_sindex = all_artificial.sindex
    artificial_flag = []

    for geom in edges_planar.geometry:
        idxs = list(artificial_sindex.query(geom.buffer(SPLIT_TOL)))
        flag = 0
        for j in idxs:
            if all_artificial.iloc[j].geometry.distance(geom) <= SPLIT_TOL:
                flag = 1
                break
        artificial_flag.append(flag)

    edges_planar["artificial"] = artificial_flag
else:
    edges_planar["artificial"] = 0

edges_original_ref = edges[["road_id", "geometry"]].copy()
edges_original_ref =
edges_original_ref[edges_original_ref["road_id"].notna()].copy()
```

```
edges_original_ref = gpd.GeoDataFrame(edges_original_ref, geometry="geometry",
crs=edges.crs)

if len(edges_original_ref) > 0 and len(edges_planar) > 0:
    edges_planar_tmp =
edges_planar.copy().reset_index().rename(columns={"index": "edge_idx_tmp"})

    nearest_join = gpd.sjoin_nearest(
        edges_planar_tmp,
        edges_original_ref,
        how="left",
        max_distance=ROAD_ID_MAX_MATCH_DIST,
        distance_col="road_match_dist"
    )

    nearest_join = nearest_join.sort_values(["edge_idx_tmp", "road_match_dist"])
    nearest_join = nearest_join.drop_duplicates(subset=["edge_idx_tmp"],
keep="first")
    nearest_join = nearest_join.set_index("edge_idx_tmp")

    edges_planar["road_id"] =
nearest_join["road_id"].reindex(edges_planar.index)
else:
    edges_planar["road_id"] = None

edges_planar = rebuild_edge_fields(edges_planar, PRECISION)
edges_planar["flow"] = 0.0

G_planar = build_graph_from_edges(edges_planar)
diagnose_graph(G_planar, "Diagnóstico tras replanarizar/nodificar red ampliada")

# 7 Conectar centroides

gdf_zonas = gpd.read_file("zonas_reproyectadas.gpkg",
layer="zonas").to_crs(CRS_METRIC)
gdf_zonas.geometry = gdf_zonas.geometry.apply(force_2d)

print("¿Queda alguna zona con Z?:", gdf_zonas.geometry.has_z.any())

zone_to_node = {}

def connect_centroid_and_split_robust(point, edges_gdf, graph, precision=0,
centroid_search=50000, split_tol=1.0, snap_tol=2.0):
    edges_sindex = edges_gdf.sindex
    candidate_idx = list(edges_sindex.query(point.buffer(centroid_search)))
    candidate_edges = edges_gdf.iloc[candidate_idx] if candidate_idx else
edges_gdf

    distances = candidate_edges.geometry.distance(point)
    nearest_idx = distances.idxmin()
    nearest_edge = edges_gdf.loc[nearest_idx]
    line = nearest_edge.geometry
```

```
proj_dist = line.project(point)
projected = line.interpolate(proj_dist)

centroid_node = node_from_point(point, precision)
projected_node = node_from_point(projected, precision)

start = nearest_edge["from_node"]
end = nearest_edge["to_node"]

start_pt = Point(start)
end_pt = Point(end)

graph.add_node(centroid_node)

if start_pt.distance(projected) <= split_tol:
    connector_geom = LineString([(point.x, point.y), start])
    graph.add_edge(centroid_node, start, weight=connector_geom.length)

    connector_row = {
        "geometry": connector_geom,
        "road_id": None,
        "artificial": 1,
        "flow": 0.0,
        "from_node": centroid_node,
        "to_node": start,
        "weight": connector_geom.length
    }

    edges_gdf = pd.concat(
        [edges_gdf, gpd.GeoDataFrame([connector_row], geometry="geometry",
        crs=edges_gdf.crs)],
        ignore_index=True
    )
    return centroid_node, edges_gdf

if end_pt.distance(projected) <= split_tol:
    connector_geom = LineString([(point.x, point.y), end])
    graph.add_edge(centroid_node, end, weight=connector_geom.length)

    connector_row = {
        "geometry": connector_geom,
        "road_id": None,
        "artificial": 1,
        "flow": 0.0,
        "from_node": centroid_node,
        "to_node": end,
        "weight": connector_geom.length
    }

    edges_gdf = pd.concat(
        [edges_gdf, gpd.GeoDataFrame([connector_row], geometry="geometry",
        crs=edges_gdf.crs)],
```

```
        ignore_index=True
    )
    return centroid_node, edges_gdf

    parts = robust_split_line_at_point(line, projected, split_tol=split_tol,
snap_tol=snap_tol)

    if len(parts) != 2:
        connector_geom = LineString([(point.x, point.y), (projected.x,
projected.y)])
        graph.add_node(projected_node)
        graph.add_edge(centroid_node, projected_node,
weight=connector_geom.length)

        connector_row = {
            "geometry": connector_geom,
            "road_id": None,
            "artificial": 1,
            "flow": 0.0,
            "from_node": centroid_node,
            "to_node": projected_node,
            "weight": connector_geom.length
        }

        edges_gdf = pd.concat(
            [edges_gdf, gpd.GeoDataFrame([connector_row], geometry="geometry",
crs=edges_gdf.crs)],
            ignore_index=True
        )
        return centroid_node, edges_gdf

    part1, part2 = parts

    node_a1 = node_from_xy(part1.coords[0][0], part1.coords[0][1], precision)
    node_a2 = node_from_xy(part1.coords[-1][0], part1.coords[-1][1], precision)
    node_b1 = node_from_xy(part2.coords[0][0], part2.coords[0][1], precision)
    node_b2 = node_from_xy(part2.coords[-1][0], part2.coords[-1][1], precision)

    if graph.has_edge(start, end):
        graph.remove_edge(start, end)

    graph.add_node(projected_node)

    if node_a1 != node_a2:
        graph.add_edge(node_a1, node_a2, weight=part1.length)
    if node_b1 != node_b2:
        graph.add_edge(node_b1, node_b2, weight=part2.length)

    connector_geom = LineString([(point.x, point.y), (projected.x,
projected.y)])
    graph.add_edge(centroid_node, projected_node, weight=connector_geom.length)
```

```
    artificial_val = nearest_edge["artificial"] if "artificial" in
nearest_edge.index else 0
    road_id_val = nearest_edge["road_id"] if "road_id" in nearest_edge.index
else None

new_rows = [
    {
        "geometry": part1,
        "road_id": road_id_val,
        "artificial": artificial_val,
        "flow": 0.0,
        "from_node": node_a1,
        "to_node": node_a2,
        "weight": part1.length
    },
    {
        "geometry": part2,
        "road_id": road_id_val,
        "artificial": artificial_val,
        "flow": 0.0,
        "from_node": node_b1,
        "to_node": node_b2,
        "weight": part2.length
    },
    {
        "geometry": connector_geom,
        "road_id": None,
        "artificial": 1,
        "flow": 0.0,
        "from_node": centroid_node,
        "to_node": projected_node,
        "weight": connector_geom.length
    }
]

edges_gdf = edges_gdf.drop(index=nearest_idx).reset_index(drop=True)
edges_gdf = pd.concat(
    [edges_gdf, gpd.GeoDataFrame(new_rows, geometry="geometry",
crs=edges_gdf.crs)],
    ignore_index=True
)

return centroid_node, edges_gdf

print("\nConectando centroides con split robusto...")
for _, row in gdf_zonas.iterrows():
    centroid_node, edges_planar = connect_centroid_and_split_robust(
        row.geometry,
        edges_planar,
        G_planar,
        precision=PRECISION,
        centroid_search=CENTROID_SEARCH,
```

```
        split_tol=SPLIT_TOL,
        snap_tol=SNAP_TOL
    )
    zone_to_node[row.ID] = centroid_node

print("Centroides conectados")

# 8 Recalcular y cerrar microgaps finales

edges_planar = rebuild_edge_fields(edges_planar, PRECISION)

if "artificial" not in edges_planar.columns:
    edges_planar["artificial"] = 0
if "road_id" not in edges_planar.columns:
    edges_planar["road_id"] = None

edges_planar["flow"] = 0.0

G_planar = build_graph_from_edges(edges_planar)
diagnose_graph(G_planar, "Diagnóstico tras conectar centroides")

print("\nCierre final de microgaps...")
edges_planar, G_planar, n_post = second_pass_connect_endpoints(
    edges_planar, G_planar, max_gap=POST_CENTROID_ENDPOINT_GAP,
    precision=PRECISION
)
print("Conexiones finales añadidas:", n_post)
diagnose_graph(G_planar, "Diagnóstico final tras microgaps")

# 9 Asignación AON

flujos = pd.read_csv(
    "Flujos_Filtrados.csv",
    dtype={"ORIGINZONE_3_ID": str, "DEST_ZONE_3_ID": str}
)

flujos["origin_node"] = flujos["ORIGINZONE_3_ID"].map(zone_to_node)
flujos["dest_node"] = flujos["DEST_ZONE_3_ID"].map(zone_to_node)
flujos["trip_count"] = flujos["f_transport_road_harmonised"]
flujos = flujos.dropna(subset=["origin_node", "dest_node"])

edge_dict = defaultdict(list)
for idx, row in edges_planar.iterrows():
    key_f = (row["from_node"], row["to_node"])
    key_b = (row["to_node"], row["from_node"])
    edge_dict[key_f].append(int(idx))
    edge_dict[key_b].append(int(idx))

no_path = 0
processed = 0
different_component = 0
```

```
different_component_demand = 0.0

node_component = {n: i for i, c in enumerate(nx.connected_components(G_planar))
for n in c}

for _, row in flujos.iterrows():
    o = row["origin_node"]
    d = row["dest_node"]
    demand = row["trip_count"]

    if node_component.get(o) != node_component.get(d):
        different_component += 1
        different_component_demand += demand
        continue

    try:
        path = nx.shortest_path(G_planar, o, d, weight="weight")
        processed += 1

        for i in range(len(path) - 1):
            key = (path[i], path[i + 1])
            idx_list = edge_dict.get(key, [])

            if not idx_list:
                continue

            best_idx = min(idx_list, key=lambda j: float(edges_planar.at[j,
"weight"])))
            edges_planar.at[best_idx, "flow"] += demand

        except nx.NetworkXNoPath:
            no_path += 1

print("\n--- RESULTADOS ---")
print("OD procesados:", processed)
print("OD sin camino:", no_path)
print("OD distinta componente:", different_component)
print("Demanda OD distinta componente:", different_component_demand)
print("Segmentos con flujo:", (edges_planar["flow"] > 0).sum())
print("Flujo total asignado:", edges_planar["flow"].sum())

# 10 Exportación por tramos

output_gpkg = "tent_espana_flujo_final.gpkg"

edges_planar.to_file(
    output_gpkg,
    layer="edges_with_flow",
    driver="GPKG"
)
print("Capa por tramos exportada")
```

```
# 11 Exportación agregada por carretera

print("\n--- EXPORTACIÓN AGREGADA ---")
print("Segmentos con road_id no nulo:", edges_planar["road_id"].notna().sum())

roads_agg_input = edges_planar[edges_planar["road_id"].notna()].copy()

if len(roads_agg_input) > 0:
    roads_agg = roads_agg_input[["road_id", "flow", "geometry"]].dissolve(
        by="road_id",
        aggfunc={"flow": "sum"}
    ).reset_index()

    print("Carreteras agregadas:", len(roads_agg))

    roads_agg.to_file(
        output_gpkg,
        layer="roads_aggregated_flow",
        driver="GPKG"
    )
    print("Capa agregada por carretera exportada")
else:
    print("No hay segmentos con road_id no nulo en edges_planar")
    print("No se exporta capa agregada por carretera")

print("Exportación completada")
```

9.5 ANEXO V – CÓDIGO PYTHON PARA LA OPTIMIZACIÓN ESPACIAL MEDIANTE MILP

```
from pathlib import Path
from time import perf_counter
from typing import List, Tuple

import geopandas as gpd
import pandas as pd
import numpy as np
import networkx as nx
import pulp
import matplotlib.pyplot as plt

from shapely.geometry import Point, LineString, MultiLineString
from scipy.spatial import cKDTree
from matplotlib.lines import Line2D

T0 = perf_counter()

def tic(msg):
    print(f"\n--- {msg} ---")
    return perf_counter()

def toc(t, msg="Tiempo"):
    dt = perf_counter() - t
    print(f"{msg}: {dt:.2f} s")

def assert_columns(df, cols, df_name="DataFrame"):
    missing = [c for c in cols if c not in df.columns]
    assert len(missing) == 0, f"{df_name} no contiene columnas: {missing}"

def print_shape(df, name):
    print(f"{name}: {df.shape[0]} filas x {df.shape[1]} columnas")

def ensure_metric_crs(gdf: gpd.GeoDataFrame, target_crs: int) -> gpd.GeoDataFrame:
    assert gdf.crs is not None, "La capa no tiene CRS definido."
    if gdf.crs.to_epsg() != target_crs:
        return gdf.to_crs(target_crs)
    return gdf

def guess_numeric_flow_col(gdf: gpd.GeoDataFrame) -> str:
    ranked = []
    for c in gdf.columns:
        if c == "geometry":
            continue
        if pd.api.types.is_numeric_dtype(gdf[c]):
            score = 0
            lc = c.lower()
```

```
for token in ["flow", "tons", "ton", "tonnes", "freight", "merc",
"tm", "carga"]:
    if token in lc:
        score += 1
    ranked.append((score, c))
assert ranked, "No se detectó ninguna columna numérica de flujo."
ranked.sort(reverse=True)
return ranked[0][1]

def geometry_to_lines(geom):
    if geom is None or geom.is_empty:
        return []
    if isinstance(geom, LineString):
        return [geom]
    if isinstance(geom, MultiLineString):
        return list(geom.geoms)
    return []

def round_xy(x, y, decimals=1):
    return (round(float(x), decimals), round(float(y), decimals))

def nearest_graph_node(point: Point, node_tree: cKDTree, node_list:
List[Tuple[float, float]]):
    dist, idx = node_tree.query([point.x, point.y], k=1)
    return node_list[idx], float(dist)

def validate_graph_node(node_xy, G, label="node"):
    assert node_xy in G, f"{label} {node_xy} no existe en el grafo."

def shortest_path_distance(G, source, target):
    validate_graph_node(source, G, "source")
    validate_graph_node(target, G, "target")
    try:
        return float(nx.shortest_path_length(G, source=source, target=target,
weight="weight"))
    except nx.NetworkXNoPath:
        return np.inf

def build_xy_tree_from_gdf(gdf: gpd.GeoDataFrame):
    assert not gdf.empty, "No se puede crear KDTree de un GeoDataFrame vacío."
    arr = np.column_stack([gdf.geometry.x.values, gdf.geometry.y.values])
    tree = cKDTree(arr)
    return arr, tree

def deduplicate_points_gdf(gdf: gpd.GeoDataFrame, tol_m=50.0) ->
gpd.GeoDataFrame:
    if gdf.empty:
        return gdf.copy()

    tmp = gdf.copy()
    if "candidate_id" not in tmp.columns:
        tmp["candidate_id"] = [f"tmp_{i}" for i in range(len(tmp))]
```

```
xs = (tmp.geometry.x / tol_m).round().astype(int)
ys = (tmp.geometry.y / tol_m).round().astype(int)
tmp["_dx"] = xs
tmp["_dy"] = ys

tmp = tmp.sort_values("candidate_id").drop_duplicates(subset=["_dx", "_dy"],
keep="first")
tmp = tmp.drop(columns=["_dx", "_dy"]).reset_index(drop=True)
return tmp

def build_graph_from_flows(flows: gpd.GeoDataFrame, decimals=1) -> nx.Graph:
    G = nx.Graph()
    for _, row in flows.iterrows():
        for line in geometry_to_lines(row.geometry):
            coords = list(line.coords)
            if len(coords) < 2:
                continue
            for i in range(len(coords) - 1):
                x1, y1 = coords[i]
                x2, y2 = coords[i + 1]
                n1 = round_xy(x1, y1, decimals=decimals)
                n2 = round_xy(x2, y2, decimals=decimals)
                if n1 == n2:
                    continue
                seg = LineString([(x1, y1), (x2, y2)])
                w = float(seg.length)
                if G.has_edge(n1, n2):
                    if w < G[n1][n2]["weight"]:
                        G[n1][n2]["weight"] = w
                        G[n1][n2]["geometry"] = seg
                else:
                    G.add_edge(n1, n2, weight=w, geometry=seg)
    return G

def build_node_index(G: nx.Graph):
    node_list = list(G.nodes)
    assert len(node_list) > 0, "El grafo no tiene nodos."
    arr = np.array(node_list)
    tree = cKDTree(arr)
    return node_list, tree

def graph_edges_gdf(G: nx.Graph, crs) -> gpd.GeoDataFrame:
    rows = []
    for u, v, data in G.edges(data=True):
        rows.append({
            "u_x": u[0], "u_y": u[1],
            "v_x": v[0], "v_y": v[1],
            "length_m": data["weight"],
            "geometry": data.get("geometry", LineString([u, v]))
        })
    return gpd.GeoDataFrame(rows, geometry="geometry", crs=crs)
```

```
def sample_points_along_line(line: LineString, spacing_km: float,
offset_km=None):
    spacing_m = spacing_km * 1000.0
    if line.length <= 0 or spacing_m <= 0:
        return []

    if offset_km is None:
        offset_m = spacing_m / 2.0
    else:
        offset_m = offset_km * 1000.0

    if offset_m >= line.length:
        return []

    dists = np.arange(offset_m, line.length, spacing_m)
    return [line.interpolate(float(d)) for d in dists]

def build_flow_sample_points(flows: gpd.GeoDataFrame, sample_spacing_km: float =
3.0):
    rows = []

    flow_id_col = "road_id" if "road_id" in flows.columns else None

    for idx, row in flows.iterrows():
        flow_id = row[flow_id_col] if flow_id_col is not None else f"flow_{idx}"

        for line in geometry_to_lines(row.geometry):
            pts = sample_points_along_line(line, spacing_km=sample_spacing_km)

            if len(pts) == 0 and line.length > 0:
                pts = [line.interpolate(line.length / 2.0)]

            for i, p in enumerate(pts):
                rows.append({
                    "flow_id": flow_id,
                    "sample_id": f"{flow_id}_{i}",
                    "geometry": p,
                })

    return gpd.GeoDataFrame(rows, geometry="geometry", crs=flows.crs)

def compute_candidate_scores(
    cand_gdf,
    flows,
    capture_radius_km,
    config,
    sample_spacing_km=3.0,
):
    if cand_gdf.empty:
        out = cand_gdf.copy()
        out["captured_tons_day_score"] = 0.0
        out["captured_trucks_day_score"] = 0.0
        out["captured_h2_t_day_score"] = 0.0
```

```
out["captured_segments_score"] = 0
out["priority_score"] = 0.0
return out

sampled = build_flow_sample_points(flows,
sample_spacing_km=sample_spacing_km)

if sampled.empty:
    out = cand_gdf.copy()
    out["captured_tons_day_score"] = 0.0
    out["captured_trucks_day_score"] = 0.0
    out["captured_h2_t_day_score"] = 0.0
    out["captured_segments_score"] = 0
    out["priority_score"] = 0.0
    return out

sample_xy = np.column_stack([sampled.geometry.x.values,
sampled.geometry.y.values])
sample_tree = cKDTree(sample_xy)
capture_r = capture_radius_km * 1000.0

flow_id_col = "road_id" if "road_id" in flows.columns else None
if flow_id_col is None:
    flows_base = flows.copy().reset_index(drop=True)
    flows_base["flow_id"] = [f"flow_{i}" for i in range(len(flows_base))]
else:
    flows_base = flows.copy().rename(columns={"road_id": "flow_id"})

flows_lookup = (
    flows_base[["flow_id", "tons_day", "trucks_day", "h2_trucks_day"]]
    .drop_duplicates(subset=["flow_id"])
    .reset_index(drop=True)
)

rows = []

for _, c in cand_gdf.iterrows():
    idxs = sample_tree.query_ball_point([c.geometry.x, c.geometry.y],
r=capture_r)

    if len(idxs) == 0:
        rows.append({
            "candidate_id": c["candidate_id"],
            "captured_tons_day_score": 0.0,
            "captured_trucks_day_score": 0.0,
            "captured_h2_t_day_score": 0.0,
            "captured_segments_score": 0,
        })
    else:
        captured_flow_ids = sampled.iloc[idxs]["flow_id"].unique()
        sub =
flows_lookup[flows_lookup["flow_id"].isin(captured_flow_ids)].copy()
```

```
stop_p = (
    config["stop_probability_urban"]
    if c["station_type"] == "urban"
    else config["stop_probability_interurban"]
)

h2_t_day = (
    sub["h2_trucks_day"] * stop_p * config["kg_per_fill"] / 1000.0
).sum()

rows.append({
    "candidate_id": c["candidate_id"],
    "captured_tons_day_score": sub["tons_day"].sum(),
    "captured_trucks_day_score": sub["trucks_day"].sum(),
    "captured_h2_t_day_score": h2_t_day,
    "captured_segments_score": len(sub),
})

score_df = pd.DataFrame(rows)
out = cand_gdf.copy().merge(score_df, on="candidate_id", how="left")
out["priority_score"] = out["captured_h2_t_day_score"]
return out

def capacity_from_demand_tpd(
    h2_tpd: float,
    allow_sub1_capacity: bool = False,
    sub1_capacity_tpd: float = 0.5,
    min_capacity_tpd: float = 1.0,
    step_tpd_if_sub1: float = 0.5,
) -> float:
    h2_tpd = float(h2_tpd)

    assert h2_tpd >= 0, "h2_tpd debe ser >= 0"
    assert sub1_capacity_tpd > 0, "sub1_capacity_tpd debe ser > 0"
    assert min_capacity_tpd > 0, "min_capacity_tpd debe ser > 0"
    assert sub1_capacity_tpd < min_capacity_tpd, "sub1_capacity_tpd debe ser < min_capacity_tpd"
    assert step_tpd_if_sub1 > 0, "step_tpd_if_sub1 debe ser > 0"

    if allow_sub1_capacity:
        if h2_tpd <= sub1_capacity_tpd:
            return sub1_capacity_tpd
        return float(np.ceil(h2_tpd / step_tpd_if_sub1) * step_tpd_if_sub1)

    if h2_tpd <= min_capacity_tpd:
        return min_capacity_tpd
    return float(np.ceil(h2_tpd))

CONFIG = {
    "flows_gpkg": "tent_espana_flujo_final.gpkg",
    "flows_layer": "roads_aggregated_flow",
    "target_crs": 25830,
```

```
"flow_col": None,
"flow_unit": "year",

"flow_growth_factor_2010_to_2024": 1.05,

"node_round_decimals": 1,
"dedup_candidate_tol_m": 50.0,

"urban_candidate_spacing_km": 3.0,
"urban_radius_euclid_km": 15.0,

"interurban_candidate_spacing_km": 30.0,

"demand_capture_radius_km": 10.0,
"flow_sampling_spacing_km": 3.0,
"avg_payload_t_per_truck": 10.0,
"h2_share": 0.01,
"stop_probability_urban": 0.05,
"stop_probability_interurban": 0.1,
"kg_per_fill": 60.0,

"penalty_per_interurban_station": 1.0,
"solver_msg": True,

"afir_max_separation_km": 200.0,

"output_dir": "output/jupyter_hidrolineras"
}

EXCLUDED_URBAN_IDS = {"U14", "U32"}

URBAN_NODES = [
    {"urban_id": "U01", "name": "A Coruña", "x": 62109.0174, "y": 4816069.9983},
    {"urban_id": "U02", "name": "Albacete", "x": 598907.0008, "y": 4316913.5309},
    {"urban_id": "U03", "name": "Algeciras", "x": 279222.0871, "y": 4001548.0399},
    {"urban_id": "U04", "name": "Alicante", "x": 719796.2455, "y": 4247564.5657},
    {"urban_id": "U05", "name": "Almería", "x": 546294.8445, "y": 4077220.5042},
    {"urban_id": "U06", "name": "Badajoz", "x": 154970.7198, "y": 4311251.2760},
    {"urban_id": "U07", "name": "Barcelona", "x": 932740.9555, "y": 4595537.1749},
    {"urban_id": "U08", "name": "Bilbao", "x": 505271.6786, "y": 4790026.0278},
    {"urban_id": "U09", "name": "Burgos", "x": 442556.5691, "y": 4688221.8629},
    {"urban_id": "U10", "name": "Cáceres", "x": 209972.8691, "y": 4374919.7523},
    {"urban_id": "U11", "name": "Cádiz", "x": 206265.1337, "y": 4046567.2220},
    {"urban_id": "U12", "name": "Cartagena", "x": 678645.4477, "y": 4163359.9628},
    {"urban_id": "U13", "name": "Castelló de la Plana", "x": 752306.0542, "y": 4430468.0943},
    {"urban_id": "U14", "name": "Ceuta", "x": 291301.4214, "y": 3973987.2801},
    {"urban_id": "U15", "name": "Córdoba", "x": 343508.4036, "y": 4194490.6266},
```

```
{
  "urban_id": "U16", "name": "Elche", "x": 701202.6668, "y": 4237611.7267},
  {"urban_id": "U17", "name": "Ferrol", "x": 77207.5273, "y": 4828146.1012},
  {"urban_id": "U18", "name": "Gijón", "x": 285064.3882, "y": 4823965.5273},
  {"urban_id": "U19", "name": "Girona", "x": 981857.2600, "y": 4663475.2305},
  {"urban_id": "U20", "name": "Granada", "x": 446588.6765, "y": 4115467.2359},
  {"urban_id": "U21", "name": "Huelva", "x": 150320.2427, "y": 4131252.9795},
  {"urban_id": "U22", "name": "Jaén", "x": 430621.9697, "y": 4180333.0003},
  {"urban_id": "U23", "name": "Jerez de la Frontera", "x": 219668.2797, "y":
4064766.5248},
  {"urban_id": "U24", "name": "Las Palmas de Gran Canaria", "x": -726142.5454,
"y": 3174017.0241},
  {"urban_id": "U25", "name": "León", "x": 288992.7164, "y": 4719397.5676},
  {"urban_id": "U26", "name": "Lugo", "x": 128601.9349, "y": 4772195.3767},
  {"urban_id": "U27", "name": "Lleida", "x": 802156.4152, "y": 4613705.5809},
  {"urban_id": "U28", "name": "Logroño", "x": 545706.8408, "y": 4701582.7028},
  {"urban_id": "U29", "name": "Madrid", "x": 441201.5416, "y": 4474530.7981},
  {"urban_id": "U30", "name": "Málaga", "x": 373080.0237, "y": 4065154.2746},
  {"urban_id": "U31", "name": "Marbella", "x": 329698.4409, "y":
4042239.0454},
  {"urban_id": "U32", "name": "Melilla", "x": 505540.0714, "y": 3905438.4211},
  {"urban_id": "U33", "name": "Murcia", "x": 664157.5267, "y": 4206607.9137},
  {"urban_id": "U34", "name": "Ourense", "x": 99123.0732, "y": 4698120.1241},
  {"urban_id": "U35", "name": "Oviedo", "x": 268775.4279, "y": 4804945.3004},
  {"urban_id": "U36", "name": "Palma", "x": 985588.8591, "y": 4395471.3749},
  {"urban_id": "U37", "name": "Pamplona", "x": 610950.0543, "y":
4741374.9580},
  {"urban_id": "U38", "name": "Salamanca", "x": 275819.1328, "y":
4538289.7166},
  {"urban_id": "U39", "name": "San Sebastián", "x": 582982.3718, "y":
4795896.3716},
  {"urban_id": "U40", "name": "Santa Cruz de Tenerife", "x": -805030.1992,
"y": 3221401.2818},
  {"urban_id": "U41", "name": "Santander", "x": 433982.2655, "y":
4812352.4733},
  {"urban_id": "U42", "name": "Santiago de Compostela", "x": 47133.0299, "y":
4762484.9777},
  {"urban_id": "U43", "name": "Sevilla", "x": 234827.1978, "y": 4142647.6534},
  {"urban_id": "U44", "name": "Tarragona", "x": 849184.1408, "y":
4561228.3239},
  {"urban_id": "U45", "name": "Valencia", "x": 725690.2043, "y":
4372208.7355},
  {"urban_id": "U46", "name": "Valladolid", "x": 356065.1821, "y":
4612579.4361},
  {"urban_id": "U47", "name": "Vigo", "x": 27034.2392, "y": 4690544.6451},
  {"urban_id": "U48", "name": "Vitoria", "x": 526693.4737, "y": 4743827.5483},
  {"urban_id": "U49", "name": "Zaragoza", "x": 676610.7039, "y":
4613789.5541},
]
```

```
outdir = Path(CONFIG["output_dir"])
outdir.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
print("Output:", outdir)
```

```
t = tic("Cargar flujos")

flows = gpd.read_file(CONFIG["flows_gpkg"], layer=CONFIG["flows_layer"])
flows = flows[flows.geometry.notnull()].copy()
flows = ensure_metric_crs(flows, CONFIG["target_crs"])

if CONFIG["flow_col"] is None or CONFIG["flow_col"] not in flows.columns:
    CONFIG["flow_col"] = guess_numeric_flow_col(flows)

FLOW_COL = CONFIG["flow_col"]
flows[FLOW_COL] = pd.to_numeric(flows[FLOW_COL], errors="coerce").fillna(0.0)

flows["flow_original"] = flows[FLOW_COL]
flows["flow_adjusted"] = flows["flow_original"] *
CONFIG["flow_growth_factor_2010_to_2024"]

if CONFIG["flow_unit"] == "year":
    flows["tons_day"] = flows["flow_adjusted"] / 365.0
    flows["tons_year"] = flows["flow_adjusted"]
else:
    flows["tons_day"] = flows["flow_adjusted"]
    flows["tons_year"] = flows["flow_adjusted"] * 365.0

flows["trucks_day"] = flows["tons_day"] / CONFIG["avg_payload_t_per_truck"]
flows["h2_trucks_day"] = flows["trucks_day"] * CONFIG["h2_share"]
flows["rep_point"] = flows.geometry.representative_point()

assert_columns(flows, ["tons_day", "trucks_day", "h2_trucks_day", "rep_point"],
"flows")
assert not flows.empty, "flows está vacío"

print_shape(flows, "flows")
display(flows.head())

toc(t, "Carga de flujos")

t = tic("Construir grafo")

G = build_graph_from_flows(flows, decimals=CONFIG["node_round_decimals"])
assert G.number_of_nodes() > 0, "El grafo no tiene nodos"
assert G.number_of_edges() > 0, "El grafo no tiene aristas"

node_list, node_tree = build_node_index(G)
edges_gdf = graph_edges_gdf(G, flows.crs)

print("Nodos:", G.number_of_nodes())
print("Aristas:", G.number_of_edges())
print_shape(edges_gdf, "edges_gdf")
display(edges_gdf.head())

toc(t, "Construcción de grafo")

t = tic("Preparar nodos urbanos")
```

```
urban_df = pd.DataFrame(URBAN_NODES)
assert not urban_df.empty, "URBAN_NODES está vacío"
assert {"urban_id", "name", "x", "y"}.issubset(urban_df.columns), "Faltan
columnas en URBAN_NODES"

urban = gpd.GeoDataFrame(
    urban_df.copy(),
    geometry=gpd.points_from_xy(urban_df["x"], urban_df["y"]),
    crs=CONFIG["target_crs"]
)

urban =
urban[~urban["urban_id"].isin(EXCLUDED_URBAN_IDS)].copy().reset_index(drop=True)
assert not urban.empty, "No quedan nodos urbanos tras exclusiones"

print_shape(urban, "urban")
display(urban.head())

toc(t, "Preparación urbana")

t = tic("Preparar red lineal para muestreo interurbano")

sampling_lines = flows[["geometry"]].copy()
sampling_lines = sampling_lines.explode(ignore_index=True)
sampling_lines = sampling_lines[sampling_lines.geometry.notnull()].copy()
sampling_lines = sampling_lines[~sampling_lines.geometry.is_empty].copy()
sampling_lines["length_m"] = sampling_lines.geometry.length
sampling_lines = sampling_lines[sampling_lines["length_m"] > 0].copy()

def normalize_line_geom(geom):
    if geom is None or geom.is_empty:
        return None
    if geom.geom_type == "LineString":
        return geom
    if geom.geom_type == "MultiLineString":
        merged = geom.line_merge() if hasattr(geom, "line_merge") else geom
        return merged
    return None

sampling_lines["geometry"] = sampling_lines.geometry.apply(normalize_line_geom)
sampling_lines = sampling_lines[sampling_lines.geometry.notnull()].copy()
sampling_lines = sampling_lines.explode(ignore_index=True)
sampling_lines["length_m"] = sampling_lines.geometry.length
sampling_lines = sampling_lines[sampling_lines["length_m"] >
0].copy().reset_index(drop=True)

print_shape(sampling_lines, "sampling_lines")
display(sampling_lines.head())

toc(t, "Red lineal preparada")

t = tic("Generar candidatas urbanas sobre la red")
```

```
urban_candidate_rows = []
urban_radius_m = CONFIG["urban_radius_euclid_km"] * 1000.0
urban_spacing_m = CONFIG["urban_candidate_spacing_km"] * 1000.0

min_dist_from_urban_m = 0.0

cand_global = 0

for _, ur in urban.iterrows():
    local_lines = sampling_lines[sampling_lines.geometry.distance(ur.geometry)
<= urban_radius_m].copy()
    assert not local_lines.empty, f"No hay líneas de red cerca de
{ur['urban_id']} - {ur['name']}"

    local_rows = []

    for _, row in local_lines.iterrows():
        line = row.geometry
        if line is None or line.is_empty or line.length <= 0:
            continue

        pts = sample_points_along_line(
            line,
            spacing_km=CONFIG["urban_candidate_spacing_km"]
        )

        for pt in pts:
            d_urban = pt.distance(ur.geometry)

            if d_urban > urban_radius_m:
                continue

            if d_urban < min_dist_from_urban_m:
                continue

            graph_node, snap_m = nearest_graph_node(pt, node_tree, node_list)

            local_rows.append({
                "candidate_id": f"urban_{ur['urban_id']}_{cand_global}",
                "geometry": pt,
                "graph_node": graph_node,
                "snap_dist_m": snap_m,
                "station_type": "urban",
                "mandatory_urban": 0,
                "source_urban_id": ur["urban_id"],
                "source_urban_name": ur["name"],
                "euclid_to_centroid_m": d_urban
            })
            cand_global += 1

local_gdf = gpd.GeoDataFrame(local_rows, geometry="geometry", crs=flows.crs)
```

```
if local_gdf.empty:
    continue

local_gdf = deduplicate_points_gdf(local_gdf,
tol_m=CONFIG["dedup_candidate_tol_m"])

urban_candidate_rows.append(local_gdf)

urban_candidates_gdf = pd.concat(urban_candidate_rows, ignore_index=True)
urban_candidates_gdf = gpd.GeoDataFrame(urban_candidates_gdf,
geometry="geometry", crs=flows.crs)

urban_candidates_gdf = compute_candidate_scores(
    urban_candidates_gdf,
    flows,
    CONFIG["demand_capture_radius_km"],
    CONFIG,
    sample_spacing_km=CONFIG["flow_sampling_spacing_km"]
)

assert not urban_candidates_gdf.empty, "urban_candidates_gdf está vacío"

urban_candidates_gdf["demand_norm"] = 0.0
urban_candidates_gdf["dist_norm"] = 0.0
urban_candidates_gdf["urban_balance_score"] = 0.0

alpha = 0.8
beta = 0.2

for uid, grp in urban_candidates_gdf.groupby("source_urban_id"):
    idx = grp.index

    demand = grp["captured_h2_t_day_score"].fillna(0.0)
    distv = grp["euclid_to_centroid_m"].fillna(0.0)

    if demand.max() > demand.min():
        demand_norm = (demand - demand.min()) / (demand.max() - demand.min())
    else:
        demand_norm = pd.Series(1.0, index=idx)

    if distv.max() > distv.min():
        dist_norm = (distv - distv.min()) / (distv.max() - distv.min())
    else:
        dist_norm = pd.Series(0.0, index=idx)

    urban_candidates_gdf.loc[idx, "demand_norm"] = demand_norm.values
    urban_candidates_gdf.loc[idx, "dist_norm"] = dist_norm.values
    urban_candidates_gdf.loc[idx, "urban_balance_score"] = alpha *
demand_norm.values - beta * dist_norm.values

urban_candidates_gdf["priority_score"] =
urban_candidates_gdf["urban_balance_score"]
```

```
print_shape(urban_candidates_gdf, "urban_candidates_gdf")
display(urban_candidates_gdf.head())

toc(t, "Candidatas urbanas")

t = tic("Seleccionar urbanas fijas")

fixed_rows = []
for uid, grp in urban_candidates_gdf.groupby("source_urban_id"):
    grp = grp.sort_values(
        ["urban_balance_score", "captured_h2_t_day_score", "candidate_id"],
        ascending=[False, False, True]
    )
    best = grp.iloc[0].copy()
    best["selected"] = 1
    best["fixed_by_rule"] = 1
    best["mandatory_urban"] = 1
    fixed_rows.append(best)

fixed_urban = gpd.GeoDataFrame(fixed_rows, geometry="geometry",
                               crs=flows.crs).reset_index(drop=True)

assert not fixed_urban.empty, "fixed_urban está vacío"

print_shape(fixed_urban, "fixed_urban")
display(fixed_urban[[
    "candidate_id",
    "source_urban_id",
    "captured_h2_t_day_score",
    "euclid_to_centroid_m",
    "urban_balance_score"
]].head())

toc(t, "Selección urbanas")

t = tic("Generar candidatas interurbanas")

fixed_nodes = set(fixed_urban["graph_node"].tolist())
fixed_points = fixed_urban.copy()

interurban_rows = []
kept_interurban_points = []
cand_id = 0
spacing_km = CONFIG["interurban_candidate_spacing_km"]

min_sep_to_urban_m = 50000
min_sep_between_interurban_m = 30000

for _, row in sampling_lines.iterrows():
    line = row.geometry
    if line is None or line.is_empty or line.length <= 0:
        continue
```

```
pts = sample_points_along_line(line, spacing_km=spacing_km)

for pt in pts:
    if not fixed_points.empty:
        if fixed_points.geometry.distance(pt).min() < min_sep_to_urban_m:
            continue

    if len(kept_interurban_points) > 0:
        inter_dists = [pt.distance(prev_pt) for prev_pt in
kept_interurban_points]
        if min(inter_dists) < min_sep_between_interurban_m:
            continue

    graph_node, snap_m = nearest_graph_node(pt, node_tree, node_list)

    if graph_node in fixed_nodes:
        continue

    interurban_rows.append({
        "candidate_id": f"inter_{cand_id}",
        "graph_node": graph_node,
        "geometry": pt,
        "snap_dist_m": snap_m,
        "station_type": "interurban",
        "mandatory_urban": 0,
        "source_urban_id": None,
        "source_urban_name": None
    })

    kept_interurban_points.append(pt)
    cand_id += 1

interurban_gdf = gpd.GeoDataFrame(interurban_rows, geometry="geometry",
crs=flows.crs)

interurban_gdf = deduplicate_points_gdf(
    interurban_gdf,
    tol_m=CONFIG["dedup_candidate_tol_m"]
)

interurban_gdf = compute_candidate_scores(
    interurban_gdf,
    flows,
    CONFIG["demand_capture_radius_km"],
    CONFIG,
    sample_spacing_km=CONFIG["flow_sampling_spacing_km"]
)

assert not interurban_gdf.empty, "interurban_gdf está vacío"
assert_columns(
    interurban_gdf,
    ["candidate_id", "graph_node", "priority_score"],
    "interurban_gdf"
```

```
)

print_shape(interurban_gdf, "interurban_gdf")
display(interurban_gdf.head())

toc(t, "Candidatas interurbanas")

t = tic("Chequeo visual")

fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(14, 14))

edges_gdf.plot(
    ax=ax1,
    color="lightgray",
    linewidth=0.5,
    alpha=0.8
)

urban_candidates_gdf.plot(
    ax=ax1,
    color="royalblue",
    marker="o",
    markersize=3,
    alpha=0.75
)

urban.plot(
    ax=ax1,
    color="black",
    marker="x",
    markersize=18,
    alpha=0.95
)

legend_urban = [
    Line2D([0], [0], color="lightgray", lw=2, label="Red"),
    Line2D([0], [0], marker="x", color="black", linestyle="None", markersize=7,
label="Nodos urbanos"),
    Line2D([0], [0], marker="o", color="royalblue", linestyle="None",
markersize=4, label="Candidatas urbanas"),
]

ax1.legend(handles=legend_urban, loc="upper right")
ax1.set_title("Red + nodos urbanos + candidatas urbanas")
ax1.set_axis_off()

png_urban = outdir / "check_candidatas_urbanas.png"
fig1.savefig(png_urban, dpi=200, bbox_inches="tight")
plt.show()

fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(14, 14))
```

```
edges_gdf.plot(
    ax=ax2,
    color="lightgray",
    linewidth=0.5,
    alpha=0.8
)

interurban_gdf.plot(
    ax=ax2,
    color="green",
    marker="o",
    markersize=5,
    alpha=0.55
)

legend_inter = [
    Line2D([0], [0], color="lightgray", lw=2, label="Red"),
    Line2D([0], [0], marker="o", color="green", linestyle="None", markersize=4,
label="Candidatas interurbanas"),
]

ax2.legend(handles=legend_inter, loc="upper right")
ax2.set_title("Red + candidatas interurbanas")
ax2.set_axis_off()

png_inter = outdir / "check_candidatas_interurbanas.png"
fig2.savefig(png_inter, dpi=200, bbox_inches="tight")
plt.show()

fig3, ax3 = plt.subplots(figsize=(14, 14))

urban.plot(
    ax=ax3,
    color="black",
    marker="x",
    markersize=22,
    alpha=0.95
)

fixed_urban.plot(
    ax=ax3,
    color="crimson",
    marker="o",
    markersize=18,
    alpha=0.95
)

legend_fixed = [
    Line2D([0], [0], marker="x", color="black", linestyle="None", markersize=8,
label="Nodos urbanos"),
    Line2D([0], [0], marker="o", color="crimson", linestyle="None",
markersize=6, label="Urbanas elegidas"),
```

```
]

ax3.legend(handles=legend_fixed, loc="upper right")
ax3.set_title("Nodos urbanos + candidatas urbanas finalmente elegidas")
ax3.set_axis_off()

png_fixed = outdir / "check_urbanas_elegidas.png"
fig3.savefig(png_fixed, dpi=200, bbox_inches="tight")
plt.show()

print("Imagen urbana guardada en:", png_urban)
print("Imagen interurbana guardada en:", png_inter)
print("Imagen urbanas elegidas guardada en:", png_fixed)

toc(t, "Chequeo visual")

t = tic("Subbloque 1 - Preparación base MILP AFIR")

AFIR_MAX_M = CONFIG["afir_max_separation_km"] * 1000.0 / 2.0
CONTROL_SPACING_KM = 25.0

milp_candidates = interurban_gdf.copy().reset_index(drop=True)
milp_candidates["candidate_id"] = milp_candidates["candidate_id"].astype(str)

fixed_urban = fixed_urban.copy().reset_index(drop=True)
fixed_urban["candidate_id"] = fixed_urban["candidate_id"].astype(str)

assert not milp_candidates.empty, "interurban_gdf está vacío"
assert not fixed_urban.empty, "fixed_urban está vacío"

print_shape(milp_candidates, "milp_candidates (interurbanas para MILP)")
print_shape(fixed_urban, "fixed_urban (urbanas fijas)")
display(milp_candidates.head())
display(fixed_urban.head())

toc(t, "Subbloque 1 - Preparación base MILP AFIR")

t = tic("Subbloque 2 - Puntos de control AFIR")

control_rows = []
control_counter = 0

for _, row in sampling_lines.iterrows():
    line = row.geometry
    if line is None or line.is_empty or line.length <= 0:
        continue

    pts = sample_points_along_line(line, spacing_km=CONTROL_SPACING_KM)

    for pt in pts:
        graph_node, snap_m = nearest_graph_node(pt, node_tree, node_list)
        control_rows.append({
```

```
        "control_id": f"ctrl_{control_counter}",
        "geometry": pt,
        "graph_node": graph_node,
        "snap_dist_m": snap_m
    })
    control_counter += 1

control_points_gdf = gpd.GeoDataFrame(control_rows, geometry="geometry",
crs=flows.crs)

control_points_gdf = deduplicate_points_gdf(
    control_points_gdf,
    tol_m=CONFIG["dedup_candidate_tol_m"]
).reset_index(drop=True)

control_points_gdf["control_id"] = [f"ctrl_{i}" for i in
range(len(control_points_gdf))]

assert not control_points_gdf.empty, "control_points_gdf está vacío"

print_shape(control_points_gdf, "control_points_gdf")
display(control_points_gdf.head())

toc(t, "Subbloque 2 - Puntos de control AFIR")

t = tic("Visualización - puntos de control AFIR")

fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 14))

edges_gdf.plot(
    ax=ax,
    color="lightgray",
    linewidth=0.5,
    alpha=0.8
)

urban.plot(
    ax=ax,
    color="black",
    marker="x",
    markersize=18,
    alpha=0.95
)

fixed_urban.plot(
    ax=ax,
    color="crimson",
    marker="o",
    markersize=18,
    alpha=0.9
)

control_points_gdf.plot(
```

```
ax=ax,
color="dodgerblue",
marker="o",
markersize=8,
alpha=0.8
)

legend_items = [
    Line2D([0], [0], color="lightgray", lw=2, label="Red"),
    Line2D([0], [0], marker="x", color="black", linestyle="None", markersize=7,
label="Nodos urbanos"),
    Line2D([0], [0], marker="o", color="crimson", linestyle="None",
markersize=6, label="Urbanas fijas"),
    Line2D([0], [0], marker="o", color="dodgerblue", linestyle="None",
markersize=5, label="Puntos de control AFIR"),
]

ax.legend(handles=legend_items, loc="upper right")
ax.set_title("Red + nodos urbanos + urbanas fijas + puntos de control AFIR")
ax.set_axis_off()

png_controls = outdir / "check_control_points.png"
fig.savefig(png_controls, dpi=200, bbox_inches="tight")

plt.show()

print("Imagen guardada en:", png_controls)
print("Número de puntos de control:", len(control_points_gdf))

toc(t, "Visualización - puntos de control AFIR")

t = tic("Subbloque 3 - Cobertura inicial por urbanas fijas (informativa)")

AFIR_MAX_M = CONFIG["afir_max_separation_km"] * 1000.0 / 2.0

fixed_sources = set(fixed_urban["graph_node"].dropna().tolist())
assert len(fixed_sources) > 0, "No hay nodos urbanos fijos válidos"

dist_to_fixed = nx.multi_source_dijkstra_path_length(
    G,
    sources=fixed_sources,
    cutoff=AFIR_MAX_M,
    weight="weight"
)

control_points_gdf["covered_by_fixed_urban"] =
control_points_gdf["graph_node"].apply(
    lambda n: int(n in dist_to_fixed)
)

print("Controles totales:", len(control_points_gdf))
print(
    "Controles cubiertos por urbanas (<= AFIR_MAX):",
```

```
int(control_points_gdf["covered_by_fixed_urban"].sum())
)

print_shape(control_points_gdf, "control_points_gdf con covered_by_fixed_urban")
display(control_points_gdf.head())

toc(t, "Subbloque 3 - Cobertura inicial por urbanas fijas (informativa)")

t = tic("Subbloque 4 - Construcción cover_map AFIR (todas las estaciones,
optimizado)")

AFIR_MAX_M = CONFIG["afir_max_separation_km"] * 1000.0 / 2.0

stations_gdf = pd.concat(
    [
        fixed_urban[["candidate_id", "graph_node", "geometry", "station_type"]],
        interurban_gdf[["candidate_id", "graph_node", "geometry",
"station_type"]],
    ],
    ignore_index=True,
)

assert_columns(
    stations_gdf,
    ["candidate_id", "graph_node", "station_type"],
    "stations_gdf",
)

print_shape(stations_gdf, "stations_gdf (urbanas fijas + interurbanas)")

node_to_station_ids = (
    stations_gdf.groupby("graph_node")["candidate_id"]
    .apply(list)
    .to_dict()
)

cover_map_afir = {}
controls_with_afir_cover = 0
controls_without_any_option = 0

for _, ctrl in control_points_gdf.iterrows():
    ctrl_id = ctrl["control_id"]
    ctrl_node = ctrl["graph_node"]

    dist_dict = nx.single_source_dijkstra_path_length(
        G,
        source=ctrl_node,
        cutoff=AFIR_MAX_M,
        weight="weight",
    )

    feasible_stations = []
```

```
for node in dist_dict.keys():
    if node in node_to_station_ids:
        feasible_stations.extend(node_to_station_ids[node])

feasible_stations = list(set(feasible_stations)) # sin duplicados

cover_map_afir[ctrl_id] = feasible_stations
if len(feasible_stations) > 0:
    controls_with_afir_cover += 1
else:
    controls_without_any_option += 1

n_control_points = control_points_gdf.shape[0]

print(f"n_control_points: {n_control_points}")
print(f"controls with at least one AFIR-feasible station:
{controls_with_afir_cover}")
print(f"controls with no AFIR-feasible station: {controls_without_any_option}")

toc(t, "Subbloque 4 - Construcción cover_map AFIR (todas las estaciones,
optimizado)")

t = tic("Subbloque 5 - Filtrado lógico de candidatas interurbanas útiles
(AFIR)")

milp_candidates = interurban_gdf.copy().reset_index(drop=True)
milp_candidates["candidate_id"] = milp_candidates["candidate_id"].astype(str)

candidate_cover_count = {cid: 0 for cid in
milp_candidates["candidate_id"].tolist()}

for ctrl_id, lst in cover_map_afir.items():
    for cid in lst:
        if cid in candidate_cover_count:
            candidate_cover_count[cid] += 1

useful_candidate_ids = [cid for cid, n in candidate_cover_count.items() if n >
0]

milp_candidates = milp_candidates[
    milp_candidates["candidate_id"].isin(useful_candidate_ids)
].copy().reset_index(drop=True)

valid_candidate_ids = set(milp_candidates["candidate_id"].tolist())

cover_map_afir_clean = {}
for ctrl_id, lst in cover_map_afir.items():
    cover_map_afir_clean[ctrl_id] = lst

controls_without_cover = [
    ctrl_id for ctrl_id, lst in cover_map_afir_clean.items() if len(lst) == 0
]
```

```
assert len(milp_candidates) > 0, "No quedan candidatas interurbanas útiles para el MILP"

print_shape(milp_candidates, "milp_candidates interurbanas útiles")
print("Candidatas interurbanas útiles:", len(milp_candidates))
print("Controles sin ninguna estación AFIR-feasible:", len(controls_without_cover))

toc(t, "Subbloque 5 - Filtrado lógico de candidatas interurbanas útiles (AFIR)")

t = tic("Subbloque 6 - Resolver MILP AFIR (urbanas fijas + interurbanas)")

stations_for_milp = pd.concat([
    fixed_urban[["candidate_id", "graph_node", "geometry", "station_type", "priority_score"]],
    milp_candidates[["candidate_id", "graph_node", "geometry", "station_type", "priority_score"]],
],
ignore_index=True,
).reset_index(drop=True)

stations_for_milp["candidate_id"] =
stations_for_milp["candidate_id"].astype(str)

station_ids = stations_for_milp["candidate_id"].tolist()
station_type_map =
stations_for_milp.set_index("candidate_id")["station_type"].to_dict()
score_map =
stations_for_milp.set_index("candidate_id")["priority_score"].to_dict()

model = pulp.LpProblem("AFIR_Stations_MILP", pulp.LpMaximize)
x = pulp.LpVariable.dicts("open", station_ids, lowBound=0, upBound=1,
cat="Binary")

fixed_ids = fixed_urban["candidate_id"].astype(str).tolist()
for cid in fixed_ids:
    if cid in x:
        model += x[cid] == 1, f"fix_urban_{cid}"

penalty = CONFIG["penalty_per_interurban_station"]
model += pulp.lpSum(
    (score_map[cid] - (penalty if station_type_map[cid] == "interurban" else
0.0)) * x[cid]
    for cid in station_ids
)

n_cover_constraints = 0
for ctrl_id, covered_list in cover_map_afir_clean.items():
    if len(covered_list) == 0:
        continue
    covered_vars = [cid for cid in covered_list if cid in x]
    if len(covered_vars) == 0:
```

```
        continue

        model += pulp.lpSum(x[cid] for cid in covered_vars) >= 1,
        f"afir_cover_{ctrl_id}"
        n_cover_constraints += 1

print("Número de variables binarias (estaciones):", len(station_ids))
print("Número de restricciones AFIR de cobertura:", n_cover_constraints)

solver = pulp.PULP_CBC_CMD(msg=CONFIG["solver_msg"])
model.solve(solver)

status_str = pulp.LpStatus[model.status]
print("Estado solver:", status_str)

assert status_str in ["Optimal", "Feasible"], f"Solver no devolvió solución
utilizable: {status_str}"

stations_for_milp["selected"] = stations_for_milp["candidate_id"].apply(
    lambda cid: int(round(pulp.value(x[cid]))) if pulp.value(x[cid]) is not None
else 0
)

selected_interurban = stations_for_milp[
    (stations_for_milp["station_type"] == "interurban") &
    (stations_for_milp["selected"] == 1)
].copy().reset_index(drop=True)

print_shape(selected_interurban, "selected_interurban (MILP)")
display(selected_interurban.head())

toc(t, "Subbloque 6 - Resolver MILP AFIR (urbanas fijas + interurbanas)")

t = tic("Subbloque 7 - Validación final AFIR")

all_selected = pd.concat(
    [fixed_urban.copy(), selected_interurban.copy()],
    ignore_index=True
)

all_selected = gpd.GeoDataFrame(
    all_selected,
    geometry="geometry",
    crs=flows.crs
).reset_index(drop=True)

assert len(all_selected) > 0, "No hay estaciones seleccionadas para validar"

station_node_to_ids = (
    all_selected.groupby("graph_node")["candidate_id"]
    .apply(list)
    .to_dict()
)
```

```
selected_nodes = set(station_node_to_ids.keys())
assert len(selected_nodes) > 0, "No hay graph_node válidos en estaciones
seleccionadas"

validation_rows = []

for _, ctrl in control_points_gdf.iterrows():
    ctrl_node = ctrl["graph_node"]

    dist_dict = nx.single_source_dijkstra_path_length(
        G,
        source=ctrl_node,
        cutoff=AFIR_MAX_M,
        weight="weight"
    )

    best_dist = np.inf
    best_station = None
    covered = 0

    for st_node, st_ids in station_node_to_ids.items():
        d = dist_dict.get(st_node, np.inf)

        if np.isfinite(d) and d <= AFIR_MAX_M:
            covered = 1

        if np.isfinite(d) and d < best_dist:
            best_dist = d
            best_station = st_ids[0]

    validation_rows.append({
        "control_id": ctrl["control_id"],
        "covered_by_fixed_urban": ctrl["covered_by_fixed_urban"],
        "covered_final": covered,
        "nearest_station_id": best_station,
        "nearest_station_dist_km": np.inf if not np.isfinite(best_dist) else
best_dist / 1000.0
    })

control_validation_df = pd.DataFrame(validation_rows)

afir_violations_df = control_validation_df[
    control_validation_df["covered_final"] == 0
].copy().reset_index(drop=True)

print_shape(control_validation_df, "control_validation_df")
print_shape(afir_violations_df, "afir_violations_df")
if len(afir_violations_df) > 0:
    display(afir_violations_df.head())

toc(t, "Subbloque 7 - Validación final AFIR")

t = tic("Subbloque 7bis - Mapa de controles sin cobertura AFIR")
```

```
assert "control_validation_df" in globals(), "No se ha generado  
control_validation_df"  
assert "afir_violations_df" in globals(), "No se ha generado afir_violations_df"  
  
print_shape(control_validation_df, "control_validation_df (todos los  
controles)")  
print_shape(afir_violations_df, "afir_violations_df (controles sin cobertura  
AFIR)")  
  
if len(afir_violations_df) == 0:  
    print("No hay puntos de control sin cobertura AFIR. No se genera mapa  
específico.")  
else:  
    controls_no_cover_gdf = control_points_gdf.merge(  
        afir_violations_df[["control_id"]],  
        on="control_id",  
        how="inner",  
    ).copy()  
  
print_shape(controls_no_cover_gdf, "controls_no_cover_gdf (para mapa)")  
  
fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 14))  
  
edges_gdf.plot(ax=ax, color="lightgray", linewidth=0.5, alpha=0.8)  
  
all_selected.plot(  
    ax=ax,  
    color="crimson",  
    marker="o",  
    markersize=18,  
    alpha=0.9,  
)  
  
control_points_gdf.plot(  
    ax=ax,  
    color="dodgerblue",  
    marker="o",  
    markersize=6,  
    alpha=0.4,  
)  
  
controls_no_cover_gdf.plot(  
    ax=ax,  
    color="yellow",  
    edgecolor="black",  
    marker="o",  
    markersize=50,  
    alpha=0.9,  
)  
  
legend_items = [  
    Line2D([0], [0], color="lightgray", lw=2, label="Red"),
```

```
Line2D([0], [0], marker="o", color="crimson", linestyle="None",
        markersize=7, label="Hidrolineras seleccionadas"),
Line2D([0], [0], marker="o", color="dodgerblue", linestyle="None",
        markersize=5, label="Puntos de control"),
Line2D([0], [0], marker="o", color="yellow", markeredgcolor="black",
        linestyle="None", markersize=8, label="Control sin cobertura
AFIR"),
]
ax.legend(handles=legend_items, loc="upper right")

ax.set_title("Puntos de control sin hidrolinera AFIR-factible cerca")
ax.set_axis_off()

png_out = outdir / "check_controlpoints_no_afir_cover.png"
fig.savefig(png_out, dpi=200, bbox_inches="tight")
plt.show()

print("Imagen guardada en", png_out)

toc(t, "Subbloque 7bis - Mapa de controles sin cobertura AFIR")

t = tic("Subbloque 8 - Demanda capturada por estación seleccionada (sin
competencia)")

assert "all_selected" in globals(), "all_selected no está definido. Ejecuta
antes el Subbloque 7."
assert "flows" in globals(), "flows no está definido."
assert "CONFIG" in globals(), "CONFIG no está definido."
assert "build_flow_sample_points" in globals(), "No existe
build_flow_sample_points. Ejecuta antes los bloques de funciones."

assert len(all_selected) > 0, "No hay estaciones seleccionadas"
assert_columns(
    all_selected,
    ["candidate_id", "station_type", "geometry"],
    "all_selected",
)
assert_columns(
    flows,
    ["tons_day", "trucks_day", "h2_trucks_day"],
    "flows",
)

selected_stations = all_selected.copy().reset_index(drop=True)
selected_stations["candidate_id"] =
selected_stations["candidate_id"].astype(str)

selected_stations = gpd.GeoDataFrame(
    selected_stations,
    geometry="geometry",
    crs=flows.crs
)
```

```
cols_to_drop_if_exist = [
    "assigned_tons_day",
    "assigned_trucks_day",
    "assigned_h2_trucks_day",
    "assigned_h2_t_day",
    "n_visible_flows",
    "n_visible_samples_total",
    "stop_probability_used",
    "recommended_capacity_tpd",
    "is_active_station",
]
selected_stations = selected_stations.drop(
    columns=[c for c in cols_to_drop_if_exist if c in
selected_stations.columns],
    errors="ignore"
)

flows_base = flows.copy().reset_index(drop=True)

if "road_id" in flows_base.columns:
    flows_base["flow_id"] = flows_base["road_id"].astype(str)
else:
    flows_base["flow_id"] = [f"flow_{i}" for i in range(len(flows_base))]

flows_lookup = (
    flows_base[["flow_id", "tons_day", "trucks_day", "h2_trucks_day"]]
    .drop_duplicates(subset=["flow_id"])
    .reset_index(drop=True)
)

sample_spacing_km = float(CONFIG["flow_sampling_spacing_km"])
capture_radius_m = float(CONFIG["demand_capture_radius_km"]) * 1000.0

flow_samples = build_flow_sample_points(
    flows_base,
    sample_spacing_km=sample_spacing_km
)

assert not flow_samples.empty, "flow_samples está vacío. Revisa la geometría de
flows o el spacing."

flow_samples["flow_id"] = flow_samples["flow_id"].astype(str)
flow_samples = gpd.GeoDataFrame(flow_samples, geometry="geometry",
crs=flows.crs)

sample_station_rows = []

for _, srow in flow_samples.iterrows():
    dists = selected_stations.geometry.distance(srow.geometry)
    mask = dists <= capture_radius_m

    if not mask.any():
        continue
```

```
visible_stations = selected_stations.loc[mask, ["candidate_id",
"station_type"]].copy()
visible_stations["flow_id"] = srow["flow_id"]
visible_stations["sample_id"] = srow["sample_id"]
visible_stations["distance_m"] = dists[mask].values

sample_station_rows.append(visible_stations)

sample_station_visibility_df = (
    pd.concat(sample_station_rows, ignore_index=True)
    if len(sample_station_rows) > 0
    else pd.DataFrame(columns=["candidate_id", "station_type", "flow_id",
"sample_id", "distance_m"])
)

if not sample_station_visibility_df.empty:
    station_flow_visibility_df = (
        sample_station_visibility_df
        .groupby(["candidate_id", "flow_id"], as_index=False)
        .agg(
            min_distance_m=("distance_m", "min"),
            n_visible_samples=("sample_id", "nunique"),
        )
    )
else:
    station_flow_visibility_df = pd.DataFrame(columns=[
        "candidate_id", "flow_id", "min_distance_m", "n_visible_samples"
    ])

station_flow_demand_df = station_flow_visibility_df.merge(
    flows_lookup,
    on="flow_id",
    how="left"
)

for col in ["tons_day", "trucks_day", "h2_trucks_day"]:
    station_flow_demand_df[col] = pd.to_numeric(
        station_flow_demand_df[col], errors="coerce"
    ).fillna(0.0)

if not station_flow_demand_df.empty:
    station_capture_summary = (
        station_flow_demand_df
        .groupby("candidate_id", as_index=False)
        .agg(
            assigned_tons_day=("tons_day", "sum"),
            assigned_trucks_day=("trucks_day", "sum"),
            assigned_h2_trucks_day=("h2_trucks_day", "sum"),
            n_visible_flows=("flow_id", "nunique"),
            n_visible_samples_total=("n_visible_samples", "sum"),
        )
    )
```

```
selected_stations = selected_stations.merge(
    station_capture_summary,
    on="candidate_id",
    how="left"
)
else:
    selected_stations["assigned_tons_day"] = 0.0
    selected_stations["assigned_trucks_day"] = 0.0
    selected_stations["assigned_h2_trucks_day"] = 0.0
    selected_stations["n_visible_flows"] = 0
    selected_stations["n_visible_samples_total"] = 0

for col in [
    "assigned_tons_day",
    "assigned_trucks_day",
    "assigned_h2_trucks_day",
]:
    if col not in selected_stations.columns:
        selected_stations[col] = 0.0
    selected_stations[col] = pd.to_numeric(selected_stations[col],
errors="coerce").fillna(0.0)

for col in [
    "n_visible_flows",
    "n_visible_samples_total",
]:
    if col not in selected_stations.columns:
        selected_stations[col] = 0
    selected_stations[col] = pd.to_numeric(selected_stations[col],
errors="coerce").fillna(0).astype(int)

stop_prob_map = {
    "urban": CONFIG["stop_probability_urban"],
    "interurban": CONFIG["stop_probability_interurban"],
}

selected_stations["stop_probability_used"] = (
    selected_stations["station_type"]
    .map(stop_prob_map)
    .fillna(0.0)
)

selected_stations["assigned_h2_t_day"] = (
    selected_stations["assigned_h2_trucks_day"]
    * selected_stations["stop_probability_used"]
    * float(CONFIG["kg_per_fill"])
    / 1000.0
)

if "capacity_from_demand_tpd" in globals():
    selected_stations["recommended_capacity_tpd"] =
selected_stations["assigned_h2_t_day"].apply(
```

```
        capacity_from_demand_tpd
    )
else:
    selected_stations["recommended_capacity_tpd"] =
selected_stations["assigned_h2_t_day"]

selected_stations["recommended_capacity_tpd"] = pd.to_numeric(
    selected_stations["recommended_capacity_tpd"], errors="coerce"
).fillna(0.0)

selected_stations["is_active_station"] = (selected_stations["n_visible_flows"] >
0).astype(int)

preferred_cols = [
    "candidate_id",
    "station_type",
    "selected",
    "fixed_by_rule",
    "mandatory_urban",
    "assigned_tons_day",
    "assigned_trucks_day",
    "assigned_h2_trucks_day",
    "assigned_h2_t_day",
    "recommended_capacity_tpd",
    "n_visible_flows",
    "n_visible_samples_total",
    "is_active_station",
]
existing_preferred_cols = [c for c in preferred_cols if c in
selected_stations.columns]
other_cols = [c for c in selected_stations.columns if c not in
existing_preferred_cols]

selected_stations = selected_stations[existing_preferred_cols +
other_cols].copy()
selected_stations = gpd.GeoDataFrame(selected_stations, geometry="geometry",
crs=flows.crs)

assert_columns(
    selected_stations,
    [
        "candidate_id",
        "station_type",
        "assigned_h2_t_day",
        "recommended_capacity_tpd",
        "n_visible_flows",
    ],
    "selected_stations",
)

print_shape(flow_samples, "flow_samples")
print_shape(sample_station_visibility_df, "sample_station_visibility_df")
print_shape(station_flow_visibility_df, "station_flow_visibility_df")
```

```
print_shape(station_flow_demand_df, "station_flow_demand_df")
print_shape(selected_stations, "selected_stations")

print("Carreteras únicas en flows:", flows_lookup["flow_id"].nunique())
print(
    "Carreteras visibles por al menos una estación seleccionada:",
    station_flow_visibility_df["flow_id"].nunique() if not
station_flow_visibility_df.empty else 0
)
print("Estaciones activas con al menos una carretera visible:",
int(selected_stations["is_active_station"].sum()))

display(
    selected_stations[
        [
            "candidate_id",
            "station_type",
            "assigned_tons_day",
            "assigned_trucks_day",
            "assigned_h2_t_day",
            "recommended_capacity_tpd",
            "n_visible_flows",
            "n_visible_samples_total",
            "is_active_station",
        ]
    ]
    .sort_values(by=["assigned_h2_t_day", "candidate_id"], ascending=[False,
True])
    .head(20)
)

display(station_flow_demand_df.head(20))

toc(t, "Subbloque 8 - Demanda capturada por estación seleccionada (sin
competencia)")

t = tic("Subbloque 8bis - Calcular LCOH CSD-only por estación")

LCOH_PARAMS = {
    "operating_days_per_year": 365.0,
    "hydrogen_purchase_eur_per_kg": 6.0,
    "opex_fixed_pct_of_capex": 0.03,
    "opex_variable_eur_per_kg": 1.00,
    "wacc": 0.08,
    "lifetime_years": 20,
    "utilization_factor": 1.0,
    "boiloff_loss_fraction": 0.0,
}

def capital_recovery_factor(wacc, lifetime_years):
    assert lifetime_years > 0, "lifetime_years debe ser > 0"
    assert wacc >= 0, "wacc debe ser >= 0"
    if wacc == 0:
```

```
        return 1.0 / lifetime_years
    r = float(wacc)
    n = int(lifetime_years)
    return r * (1.0 + r) ** n / ((1.0 + r) ** n - 1.0)

def estimate_capex_csd_from_capacity_tpd(capacity_tpd):
    """
    Estimador provisional de CAPEX CSD total [€] a partir de la capacidad [t/d].
    IMPORTANTE:
    - Sustituir por tu bloque real de CAPEX cuando lo tengas integrado.
    - Ahora mismo se deja una ley de escala sencilla para no romper el pipeline.
    """
    capacity_tpd = float(capacity_tpd)
    assert capacity_tpd > 0, "capacity_tpd debe ser > 0"

    ref_capacity_tpd = 1.0
    ref_capex_eur = 1_800_000.0
    scale_exp = 0.85

    return ref_capex_eur * (capacity_tpd / ref_capacity_tpd) ** scale_exp

def calculate_lcoh_csd_only_row(
    station_capacity_kg_day,
    operating_days_per_year,
    hydrogen_purchase_eur_per_kg,
    capex_csd_total_eur,
    opex_fixed_pct_of_capex,
    opex_variable_eur_per_kg,
    wacc,
    lifetime_years,
    utilization_factor=1.0,
    boiloff_loss_fraction=0.0,
):
    assert station_capacity_kg_day > 0, "station_capacity_kg_day debe ser > 0"
    assert operating_days_per_year > 0, "operating_days_per_year debe ser > 0"
    assert hydrogen_purchase_eur_per_kg >= 0, "hydrogen_purchase_eur_per_kg debe
ser >= 0"
    assert capex_csd_total_eur >= 0, "capex_csd_total_eur debe ser >= 0"
    assert 0 <= opex_fixed_pct_of_capex <= 1, "opex_fixed_pct_of_capex debe
estar en [0,1]"
    assert opex_variable_eur_per_kg >= 0, "opex_variable_eur_per_kg debe ser >=
0"
    assert 0 < utilization_factor <= 1, "utilization_factor debe estar en (0,1]"
    assert 0 <= boiloff_loss_fraction < 1, "boiloff_loss_fraction debe estar en
[0,1]"

    annual_h2_dispensed_kg = (
        float(station_capacity_kg_day)
        * float(operating_days_per_year)
        * float(utilization_factor)
    )
```

```
annual_h2_purchased_kg = annual_h2_dispensed_kg / (1.0 -
float(boiloff_loss_fraction))

crf = capital_recovery_factor(wacc, lifetime_years)
annualized_capex_eur_per_year = float(capex_csd_total_eur) * crf
fixed_opex_eur_per_year = float(capex_csd_total_eur) *
float(opex_fixed_pct_of_capex)

feedstock_eur_per_kg_dispensed = (
    annual_h2_purchased_kg * float(hydrogen_purchase_eur_per_kg)
) / annual_h2_dispensed_kg

fixed_csd_eur_per_kg = (
    annualized_capex_eur_per_year + fixed_opex_eur_per_year
) / annual_h2_dispensed_kg

variable_csd_eur_per_kg = float(opex_variable_eur_per_kg)
total_csd_eur_per_kg = fixed_csd_eur_per_kg + variable_csd_eur_per_kg
lcoh_dispensed_eur_per_kg = feedstock_eur_per_kg_dispensed +
total_csd_eur_per_kg

return pd.Series({
    "annual_h2_dispensed_kg": annual_h2_dispensed_kg,
    "annual_h2_purchased_kg": annual_h2_purchased_kg,
    "crf": crf,
    "annualized_capex_eur_per_year": annualized_capex_eur_per_year,
    "fixed_opex_eur_per_year": fixed_opex_eur_per_year,
    "feedstock_eur_per_kg_dispensed": feedstock_eur_per_kg_dispensed,
    "fixed_csd_eur_per_kg": fixed_csd_eur_per_kg,
    "variable_csd_eur_per_kg": variable_csd_eur_per_kg,
    "total_csd_eur_per_kg": total_csd_eur_per_kg,
    "lcoh_dispensed_eur_per_kg": lcoh_dispensed_eur_per_kg,
})

assert "selected_stations" in globals(), "selected_stations no está definido.
Ejecuta antes el Subbloque 8."
assert_columns(
    selected_stations,
    ["candidate_id", "station_type", "assigned_h2_t_day",
    "recommended_capacity_tpd"],
    "selected_stations",
)

for col in ["assigned_h2_t_day", "recommended_capacity_tpd"]:
    selected_stations[col] = pd.to_numeric(selected_stations[col],
errors="coerce").fillna(0.0)

selected_stations["station_capacity_kg_day"] =
selected_stations["recommended_capacity_tpd"] * 1000.0

selected_stations["utilization_factor"] = np.where(
```

```
selected_stations["recommended_capacity_tpd"] > 0,
selected_stations["assigned_h2_t_day"] /
selected_stations["recommended_capacity_tpd"],
0.0
)

selected_stations["utilization_factor"] =
selected_stations["utilization_factor"].clip(lower=0.001, upper=1.0)

if "capex_csd_total_eur" not in selected_stations.columns:
    selected_stations["capex_csd_total_eur"] =
selected_stations["recommended_capacity_tpd"].apply(
    estimate_capex_csd_from_capacity_tpd
)

lcoh_df = selected_stations.apply(
    lambda row: calculate_lcoh_csd_only_row(
        station_capacity_kg_day=row["station_capacity_kg_day"],
        operating_days_per_year=LCOH_PARAMS["operating_days_per_year"],
hydrogen_purchase_eur_per_kg=LCOH_PARAMS["hydrogen_purchase_eur_per_kg"],
capex_csd_total_eur=row["capex_csd_total_eur"],
opex_fixed_pct_of_capex=LCOH_PARAMS["opex_fixed_pct_of_capex"],
opex_variable_eur_per_kg=LCOH_PARAMS["opex_variable_eur_per_kg"],
wacc=LCOH_PARAMS["wacc"],
lifetime_years=LCOH_PARAMS["lifetime_years"],
utilization_factor=row["utilization_factor"],
boiloff_loss_fraction=LCOH_PARAMS["boiloff_loss_fraction"],
),
axis=1,
)

selected_stations = pd.concat([selected_stations, lcoh_df], axis=1)
selected_stations = gpd.GeoDataFrame(selected_stations, geometry="geometry",
crs=flows.crs)

selected_stations["nominal_h2_capacity_kg_day"] =
selected_stations["station_capacity_kg_day"]
selected_stations["nominal_h2_capacity_kg_year"] = (
    selected_stations["station_capacity_kg_day"] *
LCOH_PARAMS["operating_days_per_year"]
)
selected_stations["utilization_ratio"] = np.where(
    selected_stations["nominal_h2_capacity_kg_year"] > 0,
    (selected_stations["assigned_h2_t_day"] *
LCOH_PARAMS["operating_days_per_year"] * 1000)
    / selected_stations["nominal_h2_capacity_kg_year"],
    0.0,
)
selected_stations["utilization_pct"] = 100.0 *
selected_stations["utilization_ratio"]

lcohsummarytable = selected_stations[
```

```
[
    "candidate_id",
    "station_type",
    "assigned_h2_t_day",
    "recommended_capacity_tpd",
    "capex_csd_total_eur",
    "feedstock_eur_per_kg_dispensed",
    "fixed_csd_eur_per_kg",
    "variable_csd_eur_per_kg",
    "total_csd_eur_per_kg",
    "lcoh_dispensed_eur_per_kg",
    "utilization_pct",
]
].copy()

lcohsummarytable = lcohsummarytable.sort_values(
    by=["lcoh_dispensed_eur_per_kg", "candidate_id"],
    ascending=[True, True],
).reset_index(drop=True)

print_shape(selected_stations, "selected_stations")
print_shape(lcohsummarytable, "lcohsummarytable")
display(lcohsummarytable.head(15))

lcoh_table = pd.DataFrame(lcohsummarytable)
lcoh_csv = outdir / "lcoh_csd_table.csv"
lcoh_table.to_csv(lcoh_csv, index=False, encoding="utf-8-sig")

print("Tabla LCOH exportada en", lcoh_csv)

toc(t, "Subbloque 8bis - Calcular LCOH CSD-only por estación")

t = tic("Bloque intermedio - Mapa final y tabla de capacidades")

fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 14))

edges_gdf.plot(
    ax=ax,
    color="lightgray",
    linewidth=0.5,
    alpha=0.8
)

selected_stations.plot(
    ax=ax,
    color="crimson",
    marker="o",
    markersize=18,
    alpha=0.95
)

legend_items = [
    Line2D([0], [0], color="lightgray", lw=2, label="Red"),
```

```
Line2D([0], [0], marker="o", color="crimson", linestyle="None",
markersize=7, label="Hidrolineas finales")
]

ax.legend(handles=legend_items, loc="upper right")
ax.set_title("Localizaciones finales de hidrolineas")
ax.set_axis_off()

plt.show()

station_capacity_table = selected_stations[
    ["candidate_id", "recommended_capacity_tpd"]
].copy()

station_capacity_table = station_capacity_table.sort_values(
    by="candidate_id"
).reset_index(drop=True)

print_shape(station_capacity_table, "station_capacity_table")
display(station_capacity_table)

toc(t, "Bloque intermedio - Mapa final y tabla de capacidades")

t = tic("Subbloque 9.1 - Utilización de hidrolineas")

assert "selected_stations" in globals(), "selected_stations no está definido.
Ejecuta antes el Subbloque 8."
assert_columns(selected_stations, ["assigned_h2_t_day",
"recommended_capacity_tpd"], "selected_stations")

util_df = selected_stations.copy()

for col in ["assigned_h2_t_day", "recommended_capacity_tpd"]:
    util_df[col] = pd.to_numeric(util_df[col], errors="coerce").fillna(0.0)

util_df = util_df[util_df["recommended_capacity_tpd"] >
0].copy().reset_index(drop=True)
assert not util_df.empty, "No hay hidrolineas con capacidad > 0 para calcular
utilización."

util_df["utilization_pct"] = 100.0 * util_df["assigned_h2_t_day"] /
util_df["recommended_capacity_tpd"]

util_df["utilization_pct_clipped"] = util_df["utilization_pct"].clip(lower=0.0,
upper=100.0)

avg_util = util_df["utilization_pct_clipped"].mean()
median_util = util_df["utilization_pct_clipped"].median()
min_util = util_df["utilization_pct_clipped"].min()
max_util = util_df["utilization_pct_clipped"].max()

print(f"Estaciones consideradas: {len(util_df)}")
```

```
print(f"Utilización media (%): {avg_util:.1f}")
print(f"Utilización mediana (%): {median_util:.1f}")
print(f"Utilización mínima (%): {min_util:.1f}")
print(f"Utilización máxima (%): {max_util:.1f}")

bins = [0, 20, 40, 60, 80, 100]
labels = ["0-20%", "20-40%", "40-60%", "60-80%", "80-100%"]

util_df["util_bin"] = pd.cut(
    util_df["utilization_pct_clipped"],
    bins=bins,
    labels=labels,
    include_lowest=True,
    right=True,
)

dist_table = (
    util_df.groupby("util_bin")["candidate_id"]
    .count()
    .reindex(labels)
    .rename("n_stations")
    .reset_index()
)

dist_table["share_%"] = 100.0 * dist_table["n_stations"] / len(util_df)

print("\nDistribución de estaciones por rango de utilización:")
display(dist_table)

station_util_table = util_df[[
    "candidate_id",
    "station_type",
    "assigned_h2_t_day",
    "recommended_capacity_tpd",
    "utilization_pct",
    "utilization_pct_clipped",
    "util_bin",
]].copy()

print("\nEjemplo de tabla de utilización por estación:")
display(station_util_table.head())

util_csv = outdir / "station_utilization.csv"
station_util_table.to_csv(util_csv, index=False, encoding="utf-8-sig")
print("Tabla de utilización por estación guardada en", util_csv)

toc(t, "Subbloque 9.1 - Utilización de hidrolineras")

t = tic("Subbloque 9.2 - Mapa capacidad y utilización")

assert "selected_stations" in globals(), "selected_stations no está definido.
Ejecuta antes el Subbloque 8."
assert_columns(
```

```
selected_stations,
["assigned_h2_t_day", "recommended_capacity_tpd", "station_type"],
"selected_stations",
)

plotdf = selected_stations.copy()

for col in ["assigned_h2_t_day", "recommended_capacity_tpd"]:
    plotdf[col] = pd.to_numeric(plotdf[col], errors="coerce").fillna(0.0)

plotdf = plotdf[plotdf["recommended_capacity_tpd"] >
0].copy().reset_index(drop=True)
assert not plotdf.empty, "No hay hidrolineras con capacidad > 0 para
representar."

plotdf["utilization_pct"] = 100.0 * plotdf["assigned_h2_t_day"] /
plotdf["recommended_capacity_tpd"]
plotdf["utilization_pct_clipped"] = plotdf["utilization_pct"].clip(0.0, 100.0)

bins = [0, 20, 40, 60, 80, 100]
labels = ["0-20%", "20-40%", "40-60%", "60-80%", "80-100%"]
plotdf["util_bin"] = pd.cut(
    plotdf["utilization_pct_clipped"],
    bins=bins,
    labels=labels,
    include_lowest=True,
    right=True,
)

cap = plotdf["recommended_capacity_tpd"]
cap_min = cap.min()
cap_max = cap.max()

min_size = 40
max_size = 400

if cap_max > cap_min:
    plotdf["marker_size"] = min_size + (cap - cap_min) / (cap_max - cap_min) *
(max_size - min_size)
else:
    plotdf["marker_size"] = (min_size + max_size) / 2.0

color_map = {
    "0-20%": "#2f68b2",
    "20-40%": "#67b1de",
    "40-60%": "#bbbb1d",
    "60-80%": "#e6923d",
    "80-100%": "#d73027",
}
plotdf["color"] = plotdf["util_bin"].map(color_map).fillna("#aaaaaa")

fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 14))
```

```
if "edges_gdf" in globals():
    edges_gdf.plot(ax=ax, color="lightgray", linewidth=0.5, alpha=0.6)

if "urban" in globals():
    urban.plot(ax=ax, color="black", marker="x", markersize=20, alpha=0.9)

for label in labels:
    sub = plotdf[plotdf["util_bin"] == label]
    if sub.empty:
        continue
    sub.plot(
        ax=ax,
        color=sub["color"],
        markersize=sub["marker_size"],
        marker="o",
        linewidth=0,
        alpha=0.8,
        label=f"Utilización {label}",
    )

custom_handles = []

handles, labels_legend = ax.get_legend_handles_labels()
handles.extend(custom_handles)

ax.legend(handles=handles, loc="upper left", title="Utilización")

ax.set_title("Hidrolineras: capacidad (tamaño) y utilización (color)")
ax.set_axis_off()

png_out = outdir / "mapa_capacidad_utilizacion.png"
fig.savefig(png_out, dpi=200, bbox_inches="tight")
plt.show()

print("Mapa guardado en", png_out)

toc(t, "Subbloque 9.2 - Mapa capacidad y utilización")

t = tic("Subbloque 9.3 - Preparar exportación")

selected_stations_export = selected_stations.copy()
selected_interurban_export = selected_interurban.copy()
fixed_urban_export = fixed_urban.copy()
control_points_export = control_points_gdf.copy()

control_validation_export = control_points_gdf.merge(
    control_validation_df,
    on="control_id",
    how="left"
)

afir_violations_export = control_validation_export[
    control_validation_export["covered_final"] == 0
```

```
.copy().reset_index(drop=True)

summary_df = pd.DataFrame([
    "solver_status": pulp.LpStatus[model.status],
    "n_fixed_urban": len(fixed_urban),
    "n_interurban_candidates": len(interurban_gdf),
    "n_interurban_selected": len(selected_interurban),
    "n_total_selected": len(selected_stations),
    "n_control_points": len(control_points_gdf),
    "n_afir_violations": len(afir_violations_df)
])

print_shape(summary_df, "summary_df")
display(summary_df)

toc(t, "Subbloque 9.3 - Preparar exportación")

t = tic("Subbloque 10 - Exportar resultados")

gpkg_out = outdir / "resultados_hidrolineas.gpkg"
summary_csv = outdir / "summary.csv"
flow_assignments_csv = outdir / "flow_assignments.csv"
station_capacity_csv = outdir / "station_capacity_table.csv"

if gpkg_out.exists():
    gpkg_out.unlink()

selected_stations_export.to_file(gpkg_out, layer="selected_stations",
driver="GPKG")
selected_interurban_export.to_file(gpkg_out, layer="selected_interurban",
driver="GPKG")
fixed_urban_export.to_file(gpkg_out, layer="fixed_urban", driver="GPKG")
control_points_export.to_file(gpkg_out, layer="control_points", driver="GPKG")
control_validation_export.to_file(gpkg_out, layer="control_validation",
driver="GPKG")
afir_violations_export.to_file(gpkg_out, layer="afir_violations", driver="GPKG")

summary_df.to_csv(summary_csv, index=False, encoding="utf-8-sig")
station_flow_demand_csv = outdir / "station_flow_demand.csv"
station_flow_demand_df.to_csv(station_flow_demand_csv, index=False,
encoding="utf-8-sig")
station_capacity_table.to_csv(station_capacity_csv, index=False, encoding="utf-
8-sig")

print("GeoPackage exportado en:", gpkg_out)
print("Resumen exportado en:", summary_csv)
print("Asignación de flujos exportada en:", flow_assignments_csv)
print("Tabla de capacidades exportada en:", station_capacity_csv)

toc(t, "Subbloque 10 - Exportar resultados")
```