Universidad Europea

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Huella de carbono en estaciones de metro: modelo híbrido (ACV + datos reales + IA) para cuantificación y reducción de emisiones

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño

SARA LANSEROS GARCÍA

DIRIGIDO POR:

GONZALO FERNÁNDEZ SÁNCHEZ

MADRID, 2026

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a mi director, Gonzalo Fernández Sánchez, por su orientación, motivación y el acompañamiento prestado durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster. Agradezco también a la Universidad Europea la formación recibida y la oportunidad de desarrollar un trabajo que une investigación, ingeniería y experiencia profesional.

De manera muy especial, quiero dar las gracias a David, mi mayor apoyo durante todo este proceso. Gracias por motivarme en los momentos de mayor esfuerzo, por animarme a continuar, por tu paciencia y, sobre todo, por creer siempre en mí. Tu confianza ha sido fundamental para afrontar este reto y llegar hasta el final.

A mi familia, por su apoyo incondicional, por estar siempre presente y por acompañarme en cada etapa de este camino.

A mis compañeros de trabajo, por su colaboración, comprensión y disposición para ayudarme. Las experiencias y conocimientos compartidos han enriquecido este trabajo y mi aprendizaje profesional.

Por último, agradezco al personal de las empresas colaboradoras su disponibilidad y la ayuda prestada para facilitar los datos, documentos e información solicitados. Su colaboración ha sido esencial para construir un inventario basado en información real de obra y desarrollar el caso de estudio con la trazabilidad planteada.

A todos ellos, gracias por haber contribuido a hacer posible este Trabajo Fin de Máster.

A David, que nunca suelta mi mano

RESUMEN

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero constituye uno de los principales retos del sector de la construcción. En las infraestructuras subterráneas, el uso intensivo de hormigón y acero, junto con la maquinaria pesada generan una huella de carbono relevante.

El Análisis de Ciclo de Vida permite cuantificar este impacto, sin embargo, las estimaciones de proyecto se basan en datos previstos que pueden diferir de la ejecución real como se demuestra en el caso de estudio.

La información suele estar dispersa entre albaranes, registros de transporte, partes de producción y de maquinaria, lo que crea la necesidad de disponer de herramientas para recopilar la información y tener trazabilidad de los datos.

En este trabajo se desarrolla una metodología para calcular y analizar la huella de carbono de unidades de obra mediante un enfoque híbrido que integra el Análisis del Ciclo de Vida, datos reales de ejecución y técnicas de inteligencia artificial. Como caso de estudio se analizan los paneles de pantalla de hormigón armado de una estación subterránea de metro. El procedimiento considera los módulos A1-A5, se apoya en un inventario trazable desarrollado en Excel y permite comparar los escenarios *Ex ante* y *As-built*. Como complemento se incorpora una aplicación de desarrollo propio creada con apoyo de herramientas de IA destinada a automatizar los cálculos, representar los resultados y facilitar su análisis e interpretación.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida, huella de carbono, inventario, pantallas de hormigón, aplicación, inteligencia artificial.

ABSTRACT

Reducing greenhouse gas emissions is one of the main challenges facing the construction sector. In underground infrastructure, the intensive use of concrete and steel, together with heavy machinery, generates a significant carbon footprint.

Life Cycle Assessment makes it possible to quantify this impact; however, design-stage estimates are based on planned data that may differ from actual construction, as demonstrated in the case study.

Information is usually scattered across delivery notes, transport records, and production and machinery reports, which creates the need for tools to collect the information and ensure data traceability.

This work develops a methodology to calculate and analyse the carbon footprint of construction units through a hybrid approach that integrates Life Cycle Assessment, actual construction data and artificial intelligence techniques. The case study analyses the reinforced concrete diaphragm wall panels of an underground metro station. The procedure covers modules A1–A5, relies on a traceable inventory developed in Excel and allows the *Ex ante* and *As-built* scenarios to be compared. In addition, a purpose-built application, developed with the support of AI tools, is included to automate the calculations, display the results and facilitate their analysis and interpretation.

Keywords: Life Cycle Assessment, carbon footprint, inventory, concrete diaphragm walls, application, artificial intelligence.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN 1

1.1. Contexto y justificación 3

1.2. Motivación 3

1.3. Objetivos 4

1.4. Alcance y caso de estudio 5

1.5. Estructura del documento 5

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE 7

2.1. Marco normativo 9

2.1.1. Normas base para ACV y huella de carbono 9

2.1.2. Normas sectoriales de construcción e ingeniería civil 11

2.1.3. Marcos de gestión del carbono 12

2.1.4. Marco europeo general 12

2.1.5. Marco español 13

2.1.6. Implicaciones normativas para la construcción de una estación de metro dentro del ámbito del cálculo de la huella de carbono 16

2.2. Análisis del Ciclo de vida. 18

2.2.1. Evolución del ACV como herramienta de sostenibilidad. 19

2.2.2. Fases metodológicas del ACV. 19

2.2.3. Límites del sistema. 20

2.2.4. Calidad de los datos: datos primarios, datos secundarios y DAP 22

2.2.5. ACV en infraestructuras ferroviarias. 24
2.2.6. ACV *Ex ante* - ACV *As-built*. 26
2.2.7. Limitaciones del ACV tradicional y evolución hacia inventarios actualizables 27
2.3. Huella de carbono en la construcción de estaciones de metro. 28
2.3.1. Estaciones de metro. 28
2.3.2. Estructuras de contención en estaciones de metro. 32
2.3.3. Elementos dominantes de la huella de carbono en la estación. 36
2.3.4. Granularidad del análisis: del conjunto de estación al elemento constructivo. 39
2.4. Inteligencia artificial 40
2.4.1. Fundamentos y evolución histórica de la inteligencia artificial 40
2.4.2. La inteligencia artificial en el sector de la construcción 48
2.4.3. Inteligencia artificial aplicada a la sostenibilidad de infraestructuras 58
2.4.4. Inteligencia artificial aplicada a la cuantificación y gestión del carbono en construcción 71
2.5. Síntesis crítica: brechas de conocimiento y respuesta metodológica 83
2.5.1. Brecha 1: ausencia de datos primarios A5 en estudios de metro español 84
2.5.2. Brecha 2: brecha *Ex ante*/*As-built* no cuantificada en la ejecución de una estación de metro 85
2.5.3. Brecha 3: falta de metodología granular, trazable y explicable unidad a unidad 86

2.5.4. Brecha 4: ausencia de herramientas de gestión dinámica del carbono durante la ejecución 87
2.5.5. Tabla de correspondencias: brechas y respuestas metodológicas 88

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA 91

3.1. Definición del sistema, alcance y límites del ACV 93

3.1.1. Enfoque metodológico, objetivo y delimitación del estudio ... 93
3.1.2. Definición del alcance 96
3.1.3. Unidad de análisis, unidad funcional y unidades de resultado 98
3.1.4. Límites del sistema: módulos A1-A5 100
3.1.5. Exclusiones, criterios de corte y limitaciones del alcance 103

3.2. Inventario de datos y niveles de certeza 106

3.2.1. Estructura del inventario 107
3.2.2. Datos geométricos 108
3.2.3. Datos de materiales: hormigón, acero y bentonita 109
3.2.4. Datos de transporte 110
3.2.5. Datos de ejecución 111
3.2.6. Preparación y validación de los datos 112
3.2.7. Clasificación de la calidad del dato mediante Niveles de Certeza —LoC— 113
3.2.8. Tratamiento de datos ausentes 114

3.3. Herramientas, fuentes y factores de emisión 114

3.3.1. Herramientas de gestión y tratamiento de la información .. 115
3.3.2. Criterios para seleccionar los factores de emisión 116
3.3.3. Factores correspondientes a los módulos A1-A3 117
3.3.4. Factores correspondientes al transporte A4 117

3.3.5. Factores correspondientes a la ejecución A5 118
3.3.6. Registro y control de los factores seleccionados 118

3.4. Metodología de cálculo de emisiones 121

3.4.1. Principio general de cálculo 121
3.4.2. Magnitudes geométricas de referencia 122
3.4.3. Emisiones de los materiales: módulos A1-A3 123
3.4.4. Emisiones del transporte a obra: módulo A4 123
3.4.5. Emisiones de ejecución: módulo A5 124
3.4.6. Reparto de consumos registrados por jornada 125
3.4.7. Agregación de la huella por panel 126
3.4.8. Comparación *Ex ante* y *As-built* 127
3.4.9. Evaluación de la calidad del dato y propagación del Nivel de Certeza 128
3.4.10. Comprobaciones del cálculo 130
3.4.11. Estructura del inventario 130

3.5. Técnicas de inteligencia artificial empleadas 131

3.5.1. Isolation Forest 132
3.5.2. K-Means 133
3.5.3. Random Forest 133
3.5.4. SHAP 134
3.5.5. Integración de las técnicas en la aplicación 135

3.6. Metodología de la aplicación 136

3.6.1. Objetivo y alcance de la aplicación 137
3.6.2. Arquitectura y flujo de información 138
3.6.3. Funcionalidades principales 140
3.6.4. Sistema de apoyo en la toma de decisiones 141

CAPÍTULO 4: DESARROLLO 143

4.1. Caso de estudio 145

4.1.1. Descripción de la obra 145

4.2. Inventario de datos 146

4.2.1. Escenarios de inventario y fuentes documentales 147
4.2.2. Geometría del panel. Características de las pantallas 148
4.2.3. Fabricación de materiales A1-A3 149
4.2.4. Transporte de materiales 151
4.2.5. Maquinaria y electricidad A5 160
4.2.6. Asignaciones. Repartos de consumos 163
4.2.7. Registro de los factores de emisión 165
4.2.8. Huella (A1-A5) e intensidad por panel. Consolidación final del inventario 169

4.3. Aplicación HUELLA: funcionamiento del prototipo..... 169

4.3.1. Pantalla de inicio 170
4.3.2. Pantalla de selección de unidad de estudio 170
4.3.3. Inventario y motor de cálculo A1-A5 171
4.3.4. Resumen ejecutivo y consulta de resultados 172
4.3.5. Módulo comparación 174
4.3.6. Análisis espacial mediante plano DXF 175
4.3.7. Módulo de inteligencia artificial 176
4.3.8. Optimización y apoyo a la toma de decisiones 179
4.3.9. Calidad, trazabilidad y exportación 180
4.3.10. Finalidad de HUELLA 181
4.3.11. Detalles técnicos de HUELLA 182

CAPÍTULO 5: RESULTADOS..... 185

5.1. Cuantificación de emisiones..... 187

5.1.1. Unidades, recintos e intensidades 187

5.1.2. Materiales y origen de la desviación A1-A3 188
5.1.3. Emisiones A4 190
5.1.4. Emisiones A5 191
5.1.5. Calidad del dato 193
5.1.6. Huella (A1-A5) y comparación de escenarios 194

5.2. Resultado de IA 198

5.2.1. Detección de anomalías con Isolation Forest 199
5.2.2. Familias de comportamiento con K-Means 201
5.2.3. Predicción con Random Forest: muestras y procedimiento 203
5.2.4. Interpretación del modelo con SHAP 209

5.3. Discusión / Interpretación 212

5.3.1. Resultados del inventario 212
5.3.2. Resultados IA 219

CAPÍTULO 6: PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES 223

6.1. Análisis de sensibilidad 225

6.2. Propuestas de reducción de emisiones 226

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 235

7.1. Conclusiones generales 237

7.2. Conclusiones específicas 238

7.2.1. Inventario y trazabilidad 239
7.2.2. Diferencias entre Proyecto, Modificado y *As-built* 239
7.2.3. Materiales dominantes 240
7.2.4. Importancia del transporte 240
7.2.5. Maquinaria y procesos de ejecución 241
7.2.6. Variables que explican las emisiones 241
7.2.7. Medidas con mayor potencial de reducción 242

7.2.8. Aplicación HUELLA 242
7.2.9. Técnicas de inteligencia artificial 243
7.2.10. Uso de inteligencia artificial 244

7.3. Limitaciones del estudio 244

7.4. Sostenibilidad 246

7.5. Recomendaciones para el sector 249

7.6. Futuras líneas de investigación 253

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS 259

ANEXOS 279

ANEXO 1. ACCESO A DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA 280

ANEXO 2. DECLARACIÓN DE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y HERRAMIENTAS DIGITALES DE APOYO 281

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Documento de referencia, ámbito y aportación principal. (Elaboración propia) 17

Tabla 2. Elementos principales de obra civil en estaciones de metro y relevancia para el ACV. (Elaboración propia) 31

Tabla 3. Sistemas de contención aplicables a estaciones de metro. (Elaboración propia) 35

Tabla 4. Hitos en la evolución de la inteligencia artificial. (Elaboración propia) 46

Tabla 5. Resumen de las áreas de aplicación de la IA en la construcción según los artículos comentados. (Elaboración propia) 55

Tabla 6. Resumen de las principales líneas de aplicación de la IA en la sostenibilidad de infraestructuras revisadas en el apartado. (Elaboración propia) 70

Tabla 7. Tabla de correspondencia entre brechas y respuestas metodológicas. (Elaboración propia) 88

Tabla 8. Componente y aplicación en el trabajo. (Elaboración propia) 95

Tabla 9. Aspecto relacionado con alcance conceptual y empírico. (Elaboración propia) 98

Tabla 10.Definición de los elementos metodológicos. (Elaboración propia) 100

Tabla 11. Tratamiento de los módulos en el trabajo. (Elaboración propia) 103

Tabla 12. Limitaciones. (Elaboración propia) 105

Tabla 13. Estructura general del inventario. (Elaboración propia) 108

Tabla 14. Definición de los niveles de certeza y ejemplos. (Elaboración propia) 113

Tabla 15. Preferencia de fuentes y aplicación. (Elaboración propia)..... 116

Tabla 16. Relación entre los módulos estudiados, los datos de actividad y las fuentes previstas. (Elaboración propia)..... 120

Tabla 17. Correspondencia entre los cálculos y la hoja de cálculo. (Elaboración propia) 130

Tabla 18. Volumen medio de los paneles por recinto. (Elaboración propia) 148

Tabla 19. Superficie y volumen total panel por escenario con reperforaciones. (Elaboración propia) 149

Tabla 20. Número de registros por material y escenario de la hoja 02_MATERIALES. (Elaboración propia)..... 149

Tabla 21. Cantidad total registrada por material y escenario. (Elaboración propia) 150

Tabla 22 Cantidad suministrada, rechazada, sobrante e incorporada por material en el *As-built*. (Elaboración propia)..... 151

Tabla 23. Número de registros por material y escenario de la hoja 03_TRANSPORTES. (Elaboración propia)..... 151

Tabla 24. Número de viajes por material y escenario en la hoja 03_TRANSPORTES. (Elaboración propia)..... 152

Tabla 25. Recorridos suministro, tipología vehículo y consumos específicos empleados en A4. (Elaboración propia)..... 153

Tabla 26. Distancias, estado de carga y consumos de las rutas. (Elaboración propia)..... 154

Tabla 27. Consumos específicos de transporte adoptados en el inventario. (Elaboración propia)..... 155

Tabla 28. Número de registros por tipo de actividad y escenario en la hoja 05_EJECUCION. (Elaboración propia)..... 160

Tabla 29. Horas totales de los equipos considerados en el módulo A5 por escenario. (Elaboración propia) 161

Tabla 30. Consumos específicos de referencia adoptados para los equipos del módulo A5. (Elaboración propia) 161

Tabla 31. Desglose del consumo de gasóleo *As-built* de la maquinaria de ejecución. (Elaboración propia) 162

Tabla 32. Criterios de asignación de materiales y consumos a los paneles. (Elaboración propia)..... 164

Tabla 33. Factores de emisión y su fuente/criterio. (Elaboración propia).. 165

Tabla 34. Caracterización de los recintos. (Elaboración propia)..... 187

Tabla 35. Paneles con mayor y menor huella e intensidad *As-built*. (Elaboración propia)..... 188

Tabla 36. Materiales del *As-built*: cantidades y emisiones. (Elaboración propia) 189

Tabla 37. Emisiones e intensidad del módulo A4 por escenario. (Elaboración propia) 190

Tabla 38. Comparativa del desglose del módulo A5 por escenario. (Elaboración propia) 192

Tabla 39. Distribución de los Niveles de Certeza por escenario. (Elaboración propia) 193

Tabla 40. Calidad del escenario *As-built* 194

Tabla 41. Huella A1-A5 y cambios consecutivos en t CO_2e. (Elaboración propia) 195

Tabla 42. Intensidad A1-A5 y cambios consecutivos kg CO_2e/m^3. (Elaboración propia) 195

Tabla 43. Emisiones por módulo y escenario. (Elaboración propia) 196

Tabla 44. Resumen global A1-A5 y Nivel de Certeza de la hoja 07_CONSOLIDADO. (Elaboración propia) 198

Tabla 45. Pantallas señaladas por Isolation Forest y magnitudes que explican la alerta. Media de la obra: 138 m^2, 16,3 h de hidrofresa, 410 kg CO_2e/m^3. (Elaboración propia) 200

Tabla 46. Caracterización de los dos grupos obtenidos con K-Means sobre las 133 pantallas ejecutadas. (Elaboración propia) 201

Tabla 47. Particiones de pantallas utilizadas en los cuatro análisis de predicción. (Elaboración propia) 203

Tabla 48. Indicadores de calidad de los cuatro análisis de predicción. (Elaboración propia) 204

Tabla 49. Cuota de importancia SHAP por variable en los tres modelos. (Elaboración propia) 210

Tabla 50. Descomposición de A1-A3: Modificado → *As-built*. (Elaboración propia) 214

Tabla 51. Análisis de sensibilidad de la intensidad de emisiones del *As-built*. (Elaboración propia) 225

Tabla 52. Medidas de reducción propuestas, módulo y potencial estimado sobre el *As-built*. (Elaboración propia) 231

Tabla 53. Aplicación de la sostenibilidad en el trabajo. (Elaboración propia) 248

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista de la pantalla de bienvenida a la aplicación HUELLA. (Elaboración propia a partir de HUELLA)..... 170

Figura 2. Pantalla de selección de unidad de obra. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 171

Figura 3. Vista en formato tabla del inventario de HUELLA. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 172

Figura 4. Vista del inventario de HUELLA, en formato ficha. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 172

Figura 5. Resumen ejecutivo, vista 1. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 173

Figura 6. Resumen ejecutivo, vista 2. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 173

Figura 7. Resultados, vista parcial 1. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 174

Figura 8. Resultados, vista 2. (Elaboración propia a partir de HUELLA)..... 174

Figura 9. Aspecto general del módulo Comparación. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 175

Figura 10. Integración del plano DXF con el inventario. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 176

Figura 11. Módulo de inteligencia artificial. Ejemplo de resultados de K-Means. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 178

Figura 12. Módulo de inteligencia artificial, pantalla de modelo entrenado con Random Forest. Ejemplo de resultados de K-Means. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 179

Figura 13. Módulo de Optimización. Predicción, explicación SHAP y simulación de medidas de reducción sobre una pantalla seleccionada. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 180

Figura 14. Vista del módulo de Calidad. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 181

Figura 15. Vista del módulo de Calidad. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 181

Figura 16. Peso materiales *As-built*. (Elaboración propia a partir de HUELLA) 189

Figura 17. Transportes asociados por materiales 191

Figura 18. Contribuciones de ejecución con emisiones positivas. (Elaboración propia) 192

Figura 19. Peso del LoC en el escenario *As-built*. (Elaboración propia a partir de HUELLA). 194

Figura 20. Huella de los tres escenarios con escala común. (Elaboración propia a partir de HUELLA) 195

Figura 21. Composición modular de los escenarios. (Elaboración propia) . 196

Figura 22. Composición modular de los escenarios y emisiones *As-built*. (Elaboración propia a partir de HUELLA)..... 197

Figura 24. Puntuación de anomalía de Isolation Forest frente a huella *As-built* de las 133 pantallas ejecutadas. Señaladas en rojo las pantallas a revisar. (Elaboración propia a partir de HUELLA)..... 200

Figura 25. Grupos K-Means frente a la superficie real de cada pantalla: (a) huella *As-built* y (b) intensidad por m². (Elaboración propia a partir de HUELLA)..... 202

Figura 26. Huella prevista *As-built* por el modelo global frente a la huella *As-built* real en las 12 pantallas reservadas y en las 43 pantallas fuera del modelo. Banda sombreada: ±20 %. (Elaboración propia)..... 206

Figura 27. Huella prevista *As-built* frente a huella *As-built* real en los modelos entrenados por separado para (a) la caja principal y (b) la caja norte. Cuadrados: pantallas reservadas de validación; círculos: pantallas fuera del modelo. Banda sombreada: ±20 %. (Elaboración propia)..... 207

Figura 28. Aplicación a la caja norte del modelo entrenado solo con la caja principal (33 pantallas). La línea de puntos marca la huella mínima presente en el entrenamiento; por debajo de ella el modelo no puede extrapolar y devuelve un valor casi constante. (Elaboración propia). 208

Figura 29. Cuota de la importancia SHAP de cada variable en el modelo global, en el modelo de la caja principal y en el de la caja norte, calculada sobre las pantallas fuera de cada modelo. (Elaboración propia)..... 209

CAPÍTULO 1:
INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y justificación

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero se ha convertido en un criterio cada vez más presente en el diseño y la ejecución de infraestructuras. En las obras subterráneas la elevada utilización de hormigón y acero, el empleo de maquinaria especializada y el transporte de materiales y tierras genera una huella de carbono significativa durante la fase de construcción. En las infraestructuras ferroviarias españolas la construcción es la etapa del ciclo de vida que más emisiones genera (Damián & Zamorano, 2023) y, en las estaciones de metro, la producción de materiales supera el 84 % de las emisiones de la fase de materialización (Mei et al., 2024).

El Análisis de Ciclo de Vida proporciona un marco adecuado para cuantificar estas emisiones, sin embargo, su utilidad para la gestión de obra depende de la representatividad de los datos utilizados. Las estimaciones de proyecto se apoyan necesariamente en cantidades, rendimientos, distancias y factores previstos, mientras que durante la ejecución aparecen variaciones derivadas del diseño definitivo, la logística y las condiciones reales de producción. A ello se añade que la información de obra suele encontrarse dispersa entre diferentes documentos y sistemas. Esta situación justifica el desarrollo de un procedimiento que permita estructurar los datos, conservar su trazabilidad y comparar de forma coherente lo previsto con lo realmente ejecutado.

1.2. Motivación

La motivación de este trabajo parte de dos cuestiones relacionadas. La primera es convertir la huella de carbono en una información útil durante la ejecución de la obra y no únicamente en un resultado obtenido una vez

finalizados los trabajos. La segunda es analizar hasta qué punto la inteligencia artificial puede incorporarse de forma práctica al trabajo habitual de la ingeniería civil, tanto para interpretar datos de obra como para facilitar el desarrollo de herramientas específicas de apoyo.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Desarrollar y aplicar una metodología híbrida para cuantificar, comparar e interpretar la huella de carbono asociada a los módulos A1-A5 de unidades repetitivas de obra civil, aplicada a las pantallas continuas de hormigón armado de una estación de metro subterránea, integrando información de proyecto, datos reales de ejecución y trazabilidad documental, e incorporando y evaluando la utilidad de técnicas de inteligencia artificial como herramientas de apoyo al análisis y a la toma de decisiones, manteniendo el cálculo físico y el criterio técnico como referencia.

Objetivos específicos

- Definir y aplicar un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) trazable que permita estructurar la información de proyecto y los datos reales de ejecución, estableciendo el alcance, la unidad funcional y los criterios de calidad del dato necesarios para cuantificar la huella de carbono asociada a los módulos A1-A5 en los escenarios *Ex ante* (Proyecto y *Modificado)* y *As-built*.
- Cuantificar y analizar las discrepancias entre las emisiones previstas y las correspondientes a la ejecución real, distinguiendo el efecto de los cambios de cantidad, de factor de emisión y de ejecución, e identificando los materiales y procesos constructivos que constituyen los principales

focos de emisión en el caso de estudio, con el fin de proponer medidas de optimización orientadas a su reducción.

- Desarrollar y validar un prototipo de aplicación informática que permita integrar los datos, automatizar y reproducir los cálculos de la huella de carbono, verificando la reproducibilidad de sus resultados frente al inventario de referencia, con el fin de facilitar la consulta, visualización, comparación y análisis interactivo de los resultados.
- Aplicar técnicas de inteligencia artificial para detectar observaciones atípicas, identificar patrones, estimar la huella de carbono e interpretar los resultados, evaluando tanto la capacidad predictiva como las limitaciones de transferencia del modelo de predicción entre recintos de distinta geometría.

1.4. Alcance y caso de estudio

El trabajo se aplica a las pantallas continuas de hormigón armado de una estación de metro subterránea situada en España, cuyo caso se presenta de forma anonimizada. El análisis comprende 133 paneles, ejecutados principalmente con hidrofresa y lodos bentoníticos, y los módulos A1-A5 de la norma UNE-EN 15804. Se calculan tres escenarios: dos *Ex ante* (Proyecto y Modificado) basados en la documentación de proyecto y uno *As-built* obtenido a partir de albaranes, partes de maquinaria y registros de transporte. Quedan fuera del alcance el resto de unidades de la estación y los módulos B, C y D (uso, fin de vida y beneficios fuera del sistema).

1.5. Estructura del documento

El documento se organiza en siete capítulos. El capítulo 2 revisa el marco normativo, el análisis de ciclo de vida, la huella de carbono en la construcción de estaciones de metro y la aplicación de la inteligencia artificial, concluyendo con las brechas de conocimiento identificadas. El capítulo 3 define la metodología: alcance y límites del ACV, inventario y niveles de certeza, factores de emisión, cálculo de emisiones, técnicas de inteligencia artificial y aplicación. El capítulo 4 aplica la metodología al caso de estudio y describe el funcionamiento de la aplicación prototipo. El capítulo 5 presenta y discute los resultados del inventario y de los modelos de inteligencia artificial. El capítulo 6 recoge el análisis de sensibilidad y las propuestas de reducción de emisiones. Por último, el capítulo 7 expone las conclusiones, las limitaciones, la contribución a la sostenibilidad, las recomendaciones para el sector y las futuras líneas de investigación. Los anexos incluyen el inventario y la declaración de uso de herramientas de inteligencia artificial.

CAPÍTULO 2:
ESTADO DEL ARTE

2.1. Marco normativo

El cálculo de la huella de carbono en obras civiles no consiste únicamente en realizar una operación que convierte cantidades en emisiones. Deben tenerse presentes una serie de condicionantes: como son las normas metodológicas, marcos de gestión del carbono y las disposiciones legales que señalan qué debe medirse, qué resultados son aceptables y cómo se comunican, además de cómo se realiza su documentación.

En el ámbito de una obra civil de estación de metro, todo adquiere una gran relevancia debido a que se emplean materiales con una elevada intensidad de emisión de carbono, empleo de maquinaria pesada, transporte de materiales y unas condiciones de ejecución con gran variabilidad respecto a la hipótesis del proyecto.

Este apartado realiza una revisión del marco normativo que ha de ser considerado. Es necesario diferenciar el grado de aplicabilidad de las normas y documentos citados. No todas son directamente aplicables al cálculo. Hay normativa que actúa como marco de gestión y otras tienen un marcado carácter jurídico.

2.1.1. Normas base para ACV y huella de carbono

Las siguientes normas ISO determinan la base metodológica del Análisis del Ciclo de Vida (ACV):

- **ISO 14040:2026** (International Organization for Standardization, 2006a)**.** Define los principios fundamentales y el marco para realizar un Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Evalúa el impacto ambiental producido por productos y servicios desde la extracción de la materia prima hasta su

eliminación. Divide el proceso en cuatro etapas: la definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación del resultado. Representa un estándar técnico. Recomienda emplear una unidad funcional de emisión. Es un documento conceptual y estratégico.

- **ISO 14044:2006** (International Organization for Standardization, 2006b). Documento técnico que establece los requisitos y directrices fundamentales para realizar un ACV de productos y servicios, enfatizando la transparencia y la calidad de los datos. Tiene un carácter normativo y operativo, empleado para ejecutar y auditar la calidad técnica de un ACV.
- **ISO 14064-2:2019** (International Organization for Standardization, 2019a)**.** La norma trata sobre la cuantificación, seguimiento y reporte de reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel de proyecto. No está directamente relacionada con el cálculo de emisiones durante la ejecución de una obra civil. Su interés reside en que exige definir un escenario base, identificar las fuentes relevantes de emisión, establecer un sistema de seguimiento, documentar los datos empleados y gestionar su calidad.
- **ISO 14067:2018** (International Organization for Standardization, 2018)**.** Establece el marco técnico oficial para calcular y comunicar la huella de carbono de los productos. Su alcance se limita a la categoría del cambio climático. Permite trabajar con una huella de carbono parcial, siempre que el objetivo del estudio no abarque el ciclo de vida completo y su alcance se detalle.
-

2.1.2. Normas sectoriales de construcción e ingeniería civil

- **UNE-EN 15804+A2:2020** (Asociación Española de Normalización, 2020)**.** Es la principal referencia a nivel europeo, constituyendo la referencia para la elaboración de declaraciones Ambientales de producto específicamente en el sector de la construcción. Su principal aportación es establecer las reglas de Categoría de Producto Básicas que garantizan una armonización de la información ambiental.
- **ISO 21930:2017** (International Organization for Standardization, 2017). Constituye la referencia europea para la elaboración de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) y servicios en el sector de la construcción. Es decir, establece unas reglas para que las DAP de los productos se hagan con unos criterios comparables y coherentes. Su relevancia aparece cuando en el cálculo del ACV se emplean DAP que al ser de un fabricante concreto (por ejemplo, de hormigón) presentan valores más reales que los obtenidos de una base de datos general.
- **EN 17472:2022** (European Committee for Standardization, 2022)**.** Norma europea pensada para aplicar la sostenibilidad a obras de ingeniería civil, no solo a edificios o productos aislados. Por tanto, traslada el enfoque del ACV al ámbito de la ingeniería civil, estableciendo criterios para evaluar el comportamiento ambiental de una infraestructura a lo largo de sus distintas etapas. Una DAP indica el impacto ambiental de un producto concreto como 1 kg de acero. Esta norma colabora en la evaluación de una obra civil completa o una parte de esta, integrando todos los productos y operaciones como si fuera un sistema único.
- **ISO 21931-2:2019** (International Organization for Standardization, 2019b)**.** Define un marco general para evaluar el comportamiento ambiental, social y económico de las obras de construcción,

específicamente su parte 2 es para obra civil. Resalta la importancia de analizar el comportamiento global de la infraestructura y no únicamente la suma de materiales aislados.

2.1.3. Marcos de gestión del carbono

Mientras las anteriores normas fijaban principios y requisitos de cuantificación, la **PAS 2080:2023** (British Standards Institution, 2023) no las reemplaza si no que las complementa, representando un marco de gestión del carbono. Su objetivo principal es guiar a todos los agentes (promotores, proyectistas, contratistas, gestores de activos y suministradores) de la cadena de valor para avanzar hacia la neutralidad climática, promoviendo su trabajo colaborativo.

Establece un marco integral para la gestión del carbono en el sector de la construcción y de las infraestructuras a lo largo de todo el ciclo de vida. No solo ofrece una metodología de medición, sino que impulsa un cambio cultural en la industria de la construcción. Promueve pasar de una visión de activos individuales como un puente a tener una global de todo el conjunto de infraestructura de una red.

Entre los principales cambios que promueve está fijar la reducción de las emisiones de carbono como prioridad en la toma de decisiones, además, obliga a considerar las emisiones desde antes de construir la infraestructura hasta su demolición o reutilización final.

2.1.4. Marco europeo general

Dentro del marco europeo hay un reglamento y una directiva relacionados con la consecución de objetivos ambientales y la reducción de emisiones. No

detallan una metodología de cálculo para las emisiones, pero evidencian como las políticas europeas promueven, en relación con las emisiones de carbono, la valoración del ciclo completo considerando todos los elementos como un único sistema, pudiendo verificarse los cálculos realizados y la trazabilidad de los datos.

- **El Reglamento (UE) 2020/852** (2020)**.** Es conocido como Reglamento de Taxonomía, establece un marco para determinar cuándo una actividad económica puede considerarse ambientalmente sostenible. Refuerza la necesidad de demostrar la metodología adoptada para contribuir a una mejora en los objetivos ambientales. Promueve las metodologías transparentes, trazables y comparables.
- **La Directiva (UE) 2024/1275** (2024)**.** Se centra en la eficiencia energética de los edificios, no en obra civil (es una referencia contextual), reforzando la tendencia europea hacia la evaluación del ciclo de vida completo de los activos construidos.

2.1.5. Marco español

En España el marco normativo se compone de:

- **Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética** (2021)**.** Establece el marco legal para que España alcance la neutralidad climática antes del año 2050. Presenta objetivos ambiciosos para el 2030 como la reducción de emisiones contaminantes y el aumento de uso de energías renovables. Tiene una relación directa con la construcción pública de infraestructuras (como una estación de metro), al establecer directrices que van desde los criterios de adjudicación en las licitaciones hasta el diseño para reducir o eliminar las emisiones. De este modo, en

contratación pública determina que se incorporen criterios medioambientales y de sostenibilidad. Señala la importancia de promover medidas para reducir las emisiones de carbono durante las distintas fases de la construcción de las obras públicas. También promueve la reducción de residuos en la construcción. En la parte de diseño, obliga a que las infraestructuras de transporte se adecuen a los efectos derivados del cambio climático.

- **Real Decreto 214/2025, de 18 de marzo** (2025). Establece la obligación para determinadas empresas de España en calcular su huella de carbono y diseñar planes para reducir las emisiones. Afecta sobre todo a empresas de más de 250 empleados. Aunque no presenta ninguna mención con la construcción de infraestructuras si tiene una relación directa con las empresas del sector. Las empresas de construcción medianas y grandes tienen la obligación del cálculo de la huella de carbono en el área del consumo eléctrico de sus instalaciones y el combustible de la maquinaria pesada. Estable una obligatoriedad de realizar proyectos de absorción de dióxido de carbono para compensar las emisiones. Por todo ello, presenta una importancia institucional y una mejora de la cultura en la producción y reducción de emisiones de carbono.
- **Orden Circular OC 3/2024** (Dirección General de Carreteras, 2024a). Define un marco técnico para medir la huella de carbono en la construcción y mejora de firmes en las carreteras de España. Principalmente centra su foco en las etapas de producto y construcción (módulos A1-A5). Promueve la construcción de infraestructuras más sostenibles. Su alcance directo se refiere a actuaciones de firmes y explanadas en proyectos de la Dirección General de Carreteras. Sin embargo, su planteamiento metodológico es transferible a las obras de

construcción de estaciones de metro. Puesto que exige fuentes documentales asociadas a materiales, transporte y maquinaria. En consecuencia, aproxima el cálculo de huella de carbono a la lógica de presupuesto, medición y ejecución de obra. Tiene una gran relevancia por el tipo de evidencias documentales que promueve, entre ellos, albaranes de suministro, registros de transporte, partes de maquinaria y datos de producción son precisamente las fuentes que permiten transformar un ACV de proyecto en un ACV *As-built*.

- **Orden Circular OC 5/2024** (Dirección General de Carreteras, 2024b). Establece formalmente el sistema de clasificación RCEclass. Diseñado para modernizar la gestión de la Red de Carreteras del Estado. Se aprobó para dar un gran impulso a la digitalización de las infraestructuras e integrar la metodología BIM dentro de los procesos de contratación, construcción y mantenimiento. Su finalidad es la estandarización de la información que contine una carretera. Para asegurar la colaboración entre todos los agentes que participan en proyecto, construcción, mantenimiento y explotación de la Red de Carreteras del Estado, al tener acceso a la misma información actualizada. La OC 5/2024 ha sido desarrollada por la Subdirección General de Sostenibilidad e Innovación. Ello indica, un propósito más ambicioso, aunque el documento se centre en una clasificación técnica, su propósito final es facilitar la gestión de las infraestructuras para alcanzar los objetivos de sostenibilidad. Es una referencia metodológica muy útil para obras de estaciones de metro por analogía sectorial. Tener unos datos actualizados, digitalizados y perfectamente estructurados es muy útil para calcular una huella de carbono real durante de cualquier elemento construido en cualquier tipo de obra.

La normativa española actual, marca una clara dirección enfocada a la reducción de emisiones. Evolucionando de ser un aspecto voluntario hasta convertirse en una dimensión integrada dentro de la contratación, la ejecución y la explotación de las infraestructuras.

2.1.6. Implicaciones normativas para la construcción de una estación de metro dentro del ámbito del cálculo de la huella de carbono

Tras la revisión anterior, se identifican cinco requisitos metodológicos dentro del cálculo del ACV en una obra de una estación de metro.

1. El análisis de emisiones de carbono debe declarar sus límites. En una obra de una estación de metro el alcance podría ocupar las etapas A1-A5. Desde la fabricación de los materiales hasta su puesta en obra durante la ejecución de esta. Esto es coherente con la estructura modular de UNE-EN 15804 (Asociación Española de Normalización, 2020) y con el enfoque sectorial de la OC 3/2024 (Dirección General de Carreteras, 2024a). Los módulos B, C y D quedan fuera del alcance por tratarse de fases de uso, fin de vida y beneficios externos.
2. El indicador principal debería ser el potencial de calentamiento global expresado en kg CO_2e. Esta elección es coherente con ISO 14067 (International Organization for Standardization, 2018), con los enfoques de huella de carbono de producto y con la disponibilidad de factores de emisión para materiales, energía y combustibles.
3. El inventario debe ser trazable. Cada dato utilizado en el cálculo debe poder vincularse a una fuente: DAP, base de datos, albarán, parte de maquinaria, registro de transporte o estimación documentada. Además, es coherente clasificar las entradas de los datos según su origen y fiabilidad documental.

4. Un estudio riguroso debe diferenciar entre huella prevista y huella real. La lógica de PAS 2080 (British Standards Institution, 2023) y la evolución del marco español apuntan hacia la comparación entre estimaciones de carbono y datos realmente incurridos.
5. El tratamiento de los datos debe ser perfectamente auditable.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las aplicaciones principales y el ámbito de los documentos.

Tabla 1 Documento de referencia, ámbito y aportación principal. (Elaboración propia)

Documento	Ámbito	Aportación principal
ISO 14040 / 14044	ACV	Principios, fases del ACV, calidad del dato interpretación y revisión crítica.
ISO 14064-2:2019	Proyectos GEI	Cuantificación, seguimiento y reporte de emisiones a nivel de proyecto.
ISO 14067:2018	Huella de carbono de producto	Cálculo y comunicación de huella de carbono; indicador kg CO2e y huella parcial.
UNE-EN 15804+A2 / ISO 21930	DAP/construcción	Estructura modular A1-A5 y comparabilidad de DAP de hormigón, acero y otros materiales.
EN 17472:2022	Obras ing. civil	Métodos de cálculo de sostenibilidad en obras civiles.
ISO 21931-2:2019	Sostenibilidad de obra civil	Marco para evaluar y comparar obras de ingeniería civil con enfoque de ciclo de vida.
PAS 2080:2023	Gestión carbono	Gestión de carbono de ciclo de vida,
Reglamento (UE) 2020/852	Taxonomía sostenible	Marco de sostenibilidad para actividades económicas y financiación; refuerza la necesidad de evidencia verificable.
Directiva (UE) 2024/1275	Eficiencia energética / ciclo de vida	Consolida la consideración del ciclo de vida completo y el carbono embebido en el entorno construido.

Documento	Ámbito	Aportación principal
Ley 7/2021	Cambio climático y contratación pública	Introduce criterios de reducción de emisiones, huella de carbono y materiales sostenibles en contratos públicos.
RD 214/2025	Registro de huella de carbono	Refuerza cálculo, publicación y planes de reducción de huella de organizaciones y eventos.
OC 3/2024 DGC	Huella A1-A5 en firmes	Estructura cálculo A1-A5 y exige evidencia documental de materiales, transporte y maquinaria.
OC 5/2024 DGC / RCEclass	Clasificación de recursos BIM	Estandariza recursos, elementos y nomenclaturas para conectar BIM, presupuesto, obra y gestión de activos.

2.2. Análisis del Ciclo de vida.

"El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una técnica para evaluar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados a un producto, proceso o servicio, mediante la recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados y la interpretación de los resultados obtenidos".(International Organization for Standardization, 2006a).

El ACV proporciona una estructura metodológica trazable para ordenar datos heterogéneos (mediciones de proyecto, factores de emisión, transportes, consumos de maquinaria, albaranes y procesos auxiliares) permitiendo relacionar de forma coherente el diseño, la ejecución y la huella de carbono resultante.

Los resultados del ACV dependen de decisiones de alcance, calidad de los datos, reglas de asignación y elección de factores de caracterización (Finnveden et al., 2009; Hellweg & Milà I Canals, 2014).

El ACV evalúa las entradas, salidas e impactos potenciales de un sistema a lo largo de toda su vida. El enfoque cradle-to-grave persigue evitar análisis parciales que reduzcan impactos en una fase a costa de incrementarlos en otra. Esto es fundamental en construcción, por ejemplo, se pueden reducir emisiones durante la ejecución aumentando el consumo de materiales, o utilizar materiales con menor huella inicial que requieran transportes más largos. La utilidad del ACV es hacer visibles esas transferencias.

2.2.1. Evolución del ACV como herramienta de sostenibilidad.

En el ámbito de la ingeniería civil, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) se ha consolidado como una herramienta de apoyo tanto en las fases de diseño como en los procesos de contratación pública. Diversos estudios desarrollados en España han demostrado la viabilidad de incorporar el enfoque de ciclo de vida en proyectos de infraestructura viaria (Barandica et al., 2013), mientras que investigaciones más recientes en ferrocarriles, metros y túneles han ampliado su aplicación al ámbito de las infraestructuras de transporte subterráneo. Esta evolución resulta coherente con la creciente presión normativa orientada a incorporar criterios asociados al carbono embebido en las obras públicas, así como con la progresiva disponibilidad de información ambiental proporcionada por los fabricantes mediante Declaraciones Ambientales de Producto (DAP/EPD).

2.2.2. Fases metodológicas del ACV.

La metodología del ACV se establece en cuatro fases iterativas.

1. Definición del objetivo y alcance.

Se establece para qué se realiza el estudio, quien será el destinatario, qué sistema se analiza, cuáles son sus fronteras y cuál es la unidad funcional. Esta fase es crítica ya que cada unidad funcional conduce a preguntas distintas y condiciona la comparabilidad de los resultados.

2. Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).

Consiste en identificar y cuantificar las entradas y salidas del sistema: materias primas, energía, combustibles, transportes, residuos y emisiones.

En obra civil, esta fase exige combinar datos de naturaleza diversa (proyecto, presupuesto, albaranes, partes de maquinaria, rutas transporte, bases de datos ambientales, etc.) La calidad del inventario condiciona directamente la fiabilidad del resultado final.

3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV).

Los flujos físicos del inventario se traducen en indicadores ambientales mediante factores de caracterización.

4. Interpretación de resultados:

Análisis crítico e interpretación de los resultados obtenidos. Identificación de los procesos o materiales con mayor contribución, se analizan incertidumbres, se revisa la coherencia del inventario y se formulan conclusiones.

2.2.3. Límites del sistema.

La delimitación del sistema es una de las decisiones con mayor influencia en los resultados del ACV. En construcción, la norma UNE-EN 15804 introduce el concepto de módulos de información estructurando el ciclo de vida de un producto en varias partes o etapas.

Módulos A1 a A5: Etapa de producto y construcción. Ocupa desde que el material se fabrica hasta su llegada a la obra.

- A1-A3 (Fábrica): Incluye desde que se extrae la materia prima hasta que el producto se fabrica y sale de la fábrica.
- A4-A5 (Llegada y empleo en la obra): Incluye el transporte del material hasta la obra y todas las tareas de instalación.

Módulos B1 a B7: Etapa de uso. Los procesos que ocurren mientras el material forma parte de la construcción.

- B1-B5 (Mantenimiento de la estructura): Incluye lo que se contamina durante el mantenimiento, reparación o reemplazo durante su vida útil.
- B6-B7 (Funcionamiento): Se refiere a la energía y el agua que consume el producto mientras la infraestructura de la que forma parte está en funcionamiento.

Módulos C1 a C4: Es la etapa fin de vida útil. Incluye su demolición y transporte y tratamiento hasta vertedero.

Módulo D: Incluye la etapa de beneficios más allá de la infraestructura. Si cuando deja de existir, se puede reciclar o reutilizar el material.

Estos módulos permiten estudiar una parte del ciclo de vida sin perder la trazabilidad de qué procesos quedan incluidos y cuáles se excluyen.

En una obra de construcción de una estación de metro, los módulos A1-A3 se vincularían principalmente a la producción del hormigón y el acero. El módulo A4 recoge el transporte desde la fábrica hasta la obra y el módulo A5 la ejecución de la obra: excavación, ferrallado, hormigonado y todas las tareas relacionadas con estos trabajos.

La importancia del módulo A5 es doble. Por un lado, representa la fase donde se generan consumos operacionales reales de obra. Por otro, es el módulo

que más se aleja del cálculo convencional de proyecto, ya que depende de rendimientos, condiciones geotécnicas, maquinaria, organización de la obra y procesos auxiliares. Por ello, aunque los materiales dominen la huella total, A5 es el ámbito donde los datos primarios aportan mayor valor añadido.

2.2.4. Calidad de los datos: datos primarios, datos secundarios y DAP

La calidad de los datos es uno de los aspectos más sensibles en cualquier ACV de infraestructura. Según la norma ISO 14044, la calidad de los datos en un ACV debe evaluarse considerando aspectos como la representatividad tecnológica, geográfica y temporal, la completitud de la información y la consistencia metodológica, garantizando así la coherencia y credibilidad de los resultados del estudio.

A efectos metodológicos, conviene distinguir entre datos primarios y secundarios. Los datos primarios describen el proceso específico analizado: albaranes, partes de trabajo, consumos, mediciones ejecutadas o distancias reales. Los datos secundarios proceden de bases de datos, literatura o valores medios de mercado.

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP/EPD) permiten incorporar información ambiental específica de fabricante y producto, mejorando sustancialmente la representatividad de los inventarios de ciclo de vida respecto a bases de datos genéricas. Esta diferencia resulta especialmente relevante en materiales con elevada intensidad de carbono, como el hormigón y el acero, cuyos factores de emisión presentan una alta sensibilidad a variables como el tipo de cemento, el porcentaje de clínker, la procedencia de los áridos, la tecnología de fabricación del acero o el mix eléctrico asociado a los procesos productivos.

La revisión de Olsson pone de manifiesto que la aplicación del ACV al cemento y al hormigón continúa presentando una elevada variabilidad en los resultados, principalmente debido a las diferencias en los límites del sistema, las fuentes de datos utilizadas y los supuestos adoptados para la composición de los materiales (Olsson et al., 2024).

En el ámbito de la obra civil, estos aspectos tienen una relevancia especial, ya que las condiciones reales de ejecución pueden diferir significativamente de las hipótesis consideradas en fase de proyecto. En este sentido, un factor de emisión procedente de una base de datos genérica puede resultar útil como aproximación inicial; sin embargo, no representa necesariamente las condiciones específicas del caso de estudio, como el fabricante real, la planta de producción empleada, las distancias efectivas de transporte o el consumo real de maquinaria durante la ejecución de la obra.

Ecoinvent constituye una de las bases de datos más utilizadas en estudios de ACV debido a su amplia cobertura de materiales, procesos energéticos, transporte y gestión de residuos Wernet et al., (2016) describen la estructura metodológica de Ecoinvent 3, basada en datasets regionalizados y modelos de sistema que permiten adaptar los inventarios a distintos enfoques metodológicos. En el contexto español, el Banco BEDEC Construcción del Instituto de Tecnología de la Construcción (ITeC), puede complementar esta información mediante datos asociados a unidades constructivas y parámetros ambientales, especialmente en estudios relacionados con partidas de obra. No obstante, ninguna base de datos genérica puede sustituir la utilización de información primaria de obra cuando esta se encuentra disponible, es verificable y presenta una trazabilidad adecuada.

2.2.5. ACV en infraestructuras ferroviarias.

En la última década la aplicación del ACV en infraestructuras ferroviarias ha crecido de forma notable. La huella de carbono de las infraestructuras de metro ya no se evalúa únicamente a escala de red, sino también a nivel de estación, método constructivo y componente específico.

En España, Damián & Zamorano (2023) analizaron la línea de alta velocidad Madrid-Toledo y concluyeron que la construcción de la infraestructura es la etapa más contaminante al generar aproximadamente el 75% de las emisiones totales. Kortazar et al. (2023) estudiaron el proyecto de la "Y Vasca" mediante ACV, reforzando la importancia del carbono embebido en infraestructuras ferroviarias y aportando un inventario detallado posteriormente publicado como dataset abierto (Kortazar et al., 2024). Estos estudios son relevantes para el contexto español, aunque su escala de análisis es la línea ferroviaria completa y no el elemento constructivo individual.

En el ámbito específico de las infraestructuras de metro, M. Liu et al. (2018) propusieron un modelo de cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para la construcción de estaciones de metro en China basado en cuotas de proyecto. Este trabajo resulta especialmente relevante al demostrar que las estaciones pueden considerarse unidades de análisis independientes y que la estimación de emisiones puede realizarse desde etapas tempranas de diseño. Posteriormente, M. Liu et al. (2019) ampliaron esta línea de investigación mediante el análisis del potencial de mitigación de emisiones de efecto invernadero (GEI) mediante el uso de estructuras prefabricadas en la construcción.

Huang et al. (2023) integraron la evaluación de carbono y la viabilidad constructiva mediante herramientas BIM aplicadas a estaciones prefabricadas.

Desde una perspectiva tipológica más próxima al presente trabajo, Shinde et al. (2024) desarrollaron un ACV aplicado a un sistema de metro subterráneo en Mumbai. Sus resultados muestran que la construcción de las estaciones subterráneas son el mayor contribuyente a los impactos del ciclo de vida de la infraestructura, representando el 70% del total de las emisiones. Esto refuerza la necesidad de estudiar con mayor nivel de detalle las unidades constructivas que las integran.

De forma paralela, Chen et al. (2024) desarrollaron un marco de trabajo digital para evaluar y reducir la huella de carbono en la ejecución de túneles mediante Tunnel Boring Machine (TBM).

Guo et al. (2025) analizaron la huella de carbono generada durante la construcción de túneles de metro en China concluyendo que la producción de materiales de construcción y el uso de maquinaria pesada en obra representan más del 95% del impacto ambiental total. Además, demostraron que estas emisiones siguen el principio de Pareto, concentrándose la mayor parte del impacto en unos pocos elementos críticos, como el acero, el hormigón y la maquinaria de excavación.

Algunos de estos estudios coinciden en señalar que las obras subterráneas requieren modelos de evaluación más específicos y desagregados que los ACV agregados convencionales.

Una conclusión común de esta literatura es que los materiales estructurales dominan una parte importante de la huella de carbono; sin embargo, los

procesos de construcción y transporte también desempeñan un papel significativo y no pueden ser ignorados. En estaciones y túneles de metro, actividades como la excavación, el transporte de tierras, los sistemas de sostenimiento, la gestión de lodos, las instalaciones auxiliares y el consumo energético de la maquinaria generan impactos estrechamente vinculados a las condiciones reales de ejecución de la obra.

2.2.6. ACV *Ex ante* - ACV *As-built*.

El ACV *Ex ante* se realiza antes o durante la fase de diseño, apoyándose en mediciones de proyecto, rendimientos previstos y factores de emisión disponibles. Es útil para comparar alternativas, justificar decisiones de diseño y establecer una línea base. Sin embargo, su fiabilidad depende de que los supuestos iniciales se mantengan durante la obra.

El ACV *As-built* se calcula a partir de lo realmente ejecutado: mediciones reales, albaranes, consumos de maquinaria, distancias efectivas y partes de producción. Su valor es mayor para verificar el comportamiento final del proyecto, pero exige recopilar y depurar documentación que no siempre está digitalizada y en formatos estandarizados. En obras subterráneas, esta distinción es crítica, porque la ejecución puede modificar cantidades, rendimientos y consumos por causas geotécnicas, logísticas u operacionales.

La literatura sobre metodologías de evaluación ambiental, como la revisada por Finnveden et al. (2009), documenta que los modelos de ACV predictivos suelen presentar altos grados de incertidumbre debido a la variabilidad de los datos, las hipótesis de los escenarios futuros y las elecciones metodológicas. Esto refuerza el valor de calcular el ACV *As-built* a partir de lo realmente ejecutado.

2.2.7. Limitaciones del ACV tradicional y evolución hacia inventarios actualizables

El ACV tradicional presenta una limitación significativa desde la perspectiva de la gestión de obra, ya que habitualmente se desarrolla mediante un enfoque estático, ya que el inventario ambiental se construye a partir de información recopilada en un momento determinado y los resultados se interpretan posteriormente, una vez finalizado el análisis. Esta aproximación resulta adecuada cuando el objetivo consiste en comparar alternativas de diseño o justificar una declaración ambiental, sin embargo, presenta importantes limitaciones cuando se pretende gestionar y monitorizar las emisiones durante la fase de ejecución.

En particular, este enfoque no incorpora de manera sistemática los datos reales generados diariamente en obra, como consumos efectivos de maquinaria, rendimientos de producción, transporte de materiales o variaciones operativas del proceso constructivo.

Las líneas recientes de investigación apuntan hacia inventarios más dinámicos, apoyados en BIM, gemelos digitales, sensores, bases de datos ambientales y automatización. No obstante, en este apartado no se desarrolla aún la IA como solución, sino que se identifica una necesidad metodológica: si el ACV quiere ser útil para la obra, debe poder actualizarse con datos reales y mantener trazabilidad. El enfoque dinámico no sustituye al ACV normalizado, sino que lo alimenta con información más representativa.

Para una infraestructura subterránea, esa actualización puede tener periodicidad diaria, semanal o quincenal, dependiendo de la disponibilidad de partes y albaranes. La clave no es la inmediatez absoluta, sino la capacidad de convertir datos de ejecución en información ambiental verificable.

2.3. Huella de carbono en la construcción de estaciones de metro.

Las estaciones de metro constituyen uno de los elementos de mayor complejidad técnica y ambiental dentro de una infraestructura ferroviaria urbana. A diferencia de los tramos de túnel, que suelen analizarse como elementos lineales, una estación concentra en un volumen relativamente reducido una excavación profunda, sistemas de contención, losas estructurales, muros interiores, pilares, conexiones con accesos, ventilación, galerías auxiliares y un conjunto de instalaciones que condicionan tanto la fase de construcción como la posterior operación. Desde el punto de vista del Análisis de Ciclo del Vida (ACV), esta concentración de materiales, maquinaria y procesos convierte a la estación en una unidad especialmente relevante para estudiar el carbono embebido de la obra civil.

Este apartado se centra en la obra civil de estaciones de metro, excluyendo la parte de túnel. Esta decisión permite revisar con mayor claridad los elementos que condicionan la huella de carbono de una estación ejecutada en entorno urbano.

2.3.1. Estaciones de metro.

Una estación de metro subterránea se puede entender como una gran caja estructural enterrada, construida para permitir la circulación de trenes, el acceso de viajeros y la integración de instalaciones ferroviarias, eléctricas, de ventilación y seguridad. En términos de obra civil, esta caja requiere una secuencia constructiva compleja:

1. Se estabiliza el terreno mediante un sistema de contención.
2. Se excava el recinto.

3. Se ejecutan los elementos estructurales principales (losas, muros, pilares y contrafuertes).
4. Se completan accesos, galerías, acabados e instalaciones.

Cada una de estas fases consume materiales, energía y maquinaria, lo cual genera emisiones.

Los impactos en una estación se distribuyen entre los módulos A1-A5. Los módulos A1-A3 recogen la fabricación de productos y materiales, siendo los principales el hormigón y el acero. El módulo A4 incorpora el transporte de esos productos hasta la obra. El módulo A5 incluye el proceso constructivo propiamente dicho: ejecución de pantallas, excavación, movimiento de tierras, bombeos, grúas, plantas de lodos, maquinaria de contención, hormigonados, compactaciones, demoliciones parciales y gestión de residuos. Esta separación modular es útil porque permite diferenciar entre emisiones asociadas a los materiales y emisiones asociadas a la forma de construir.

La literatura reciente confirma que las estaciones subterráneas pueden tener un peso muy elevado dentro de la huella de una línea de metro. Shinde et al. (2024) en un ACV aplicado a una línea de metro subterránea en Mumbai, identifican que la construcción de estaciones subterráneas domina el impacto de la infraestructura. Aunque los resultados concretos no son directamente trasladables al caso de Madrid, sí son útiles para reforzar una idea general: las estaciones no son elementos accesorios desde el punto de vista ambiental, sino nodos constructivos de gran intensidad material y energética.

A escala global, Mao et al. (2021) indica que hasta 2020, las redes de metro de 219 ciudades acumularon un stock de 2.500 millones de toneladas de

materiales de construcción, lo que equivale a 560 millones de toneladas de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) embebidas. Este tipo de estudios no entra al detalle de cada elemento constructivo de una estación, pero permite contextualizar la importancia del problema: los metros son infraestructuras ambientalmente beneficiosas durante la operación por su capacidad de desplazar movilidad privada, pero su construcción exige grandes cantidades de hormigón, acero, áridos y energía. Por ello, el análisis de carbono de sus elementos constructivos debe formar parte de la evaluación de sostenibilidad. Según este artículo, las emisiones embebidas en la construcción de la infraestructura equivalen a unos 23 años de las emisiones derivadas de su funcionamiento operativo por lo que controlar y tratar de reducir las emisiones durante la construcción es fundamental.

En el caso de una estación, los elementos que suelen concentrar el carbono embebido son aquellos que combinan dos características: grandes cantidades de material y procesos constructivos intensivos. Las losas y muros de hormigón armado concentran emisiones por el volumen de hormigón y acero. Los sistemas de contención añaden, además, maquinaria especializada, lodos, perforación o excavación profunda. La excavación y gestión de tierras generan emisiones por consumo de maquinaria, transporte y destino final del material excavado. Por tanto, la huella de la estación no puede explicarse a partir de un único elemento, sino como resultado de la interacción entre estructura, terreno, proceso constructivo y logística.

Tabla 2. Elementos principales de obra civil en estaciones de metro y relevancia para el ACV. (Elaboración propia)

Elemento obra civil	Función en la estación	Principales drivers de huella	Módulos ACV más afectados
Sistemas de contención	Estabilizar el terreno y permitir la excavación profunda en entorno urbano.	Hormigón, acero, lodos, maquinaria especializada, sobreconsumos y profundidad.	A1-A3, A4, A5
Excavación del recinto	Retirar el terreno hasta la cota de estación y generar el volumen útil.	Volumen excavado, tipo de terreno, transporte, distancia a gestor, reutilización o vertedero.	A5 principalmente; A4 si hay transporte significativo
Losas principales	Formar cubierta, niveles intermedios y losa de fondo; aportar rigidez y estabilidad.	Volumen de hormigón, cuantía de acero, tipo de cemento, espesor, impermeabilización, luces, bombeo de hormigón, grúas.	A1-A3, A4, A5
Muros, pilares y estructura interior	Configurar recintos, soportar cargas verticales y organizar espacios interiores.	Hormigón, acero, encofrados, bombeo de hormigón, grúas.	A1-A3, A5
Sistemas provisionales	Garantizar estabilidad durante fases intermedias de obra.	Puntales metálicos, anclajes, celosías, apeos, montaje/desmontaje, reutilización.	A1-A3 si son nuevos; A5 si son reutilizables
Gestión de agua y lodos	Controlar nivel freático, estabilidad y limpieza de excavación.	Bombeos, energía eléctrica, tratamiento de lodos, bentonita, gestión de residuos.	A1-A3, A5

La tabla muestra que la importancia ambiental de una estación no se limita a la contención. Las pantallas o pilotes son relevantes porque permiten abrir el recinto, pero la excavación, las losas y la estructura interior también pueden ser determinantes. En muchos casos, el peso principal de la huella procede de los materiales de construcción, especialmente el hormigón y el acero.

En un estudio específico sobre estaciones de metro, Mei et al., (2024) concluyen que la fase de producción de materiales representa más del 84% del total de las emisiones en la fase de materialización, independientemente del método constructivo empleado en las alternativas analizadas (a cielo abierto, cut-and-cover o método inverso). La construcción de la estructura principal (que incluye losas y estructura interior) aporta más del 60% de las emisiones totales de la fase de materialización en los tres métodos evaluados.

Esta conclusión es coherente con otros trabajos recientes que identifican el hormigón y el acero como recursos dominantes en la construcción de estaciones de metro subterráneas (Mei et al., 2025).

2.3.2. Estructuras de contención en estaciones de metro.

Se puede definir una estructura de contención como una construcción estructural, cuyo fin es contener los empujes de tierras que pueden afectar a una determinada obra.

Sus funciones principales son:

- Realizar de forma segura la excavación.
- Proteger construcciones próximas.
- Controlar la entrada de agua.
- Limitar las deformaciones en el entorno urbano.

Pueden tener carácter provisional o permanente.

Desde el punto de vista ambiental, representan uno de los capítulos con mayor huella de carbono debido al alto consumo de hormigón, acero, maquinaria pesada y transportes asociados.

La construcción de estaciones de metro requiere excavaciones profundas. Al estar situadas en entornos urbanos es necesario ejecutar una estructura que sea capaz de soportar los empujes del terreno, las cargas de los edificios y servicios urbanos próximos, el tráfico y en ocasiones, la presión hidrostática. Realizar una correcta contención del terreno es fundamental para la seguridad de la obra y la protección del entorno. Una mala elección del sistema de contención puede generar mayores deformaciones, más afección al tráfico, más ruido, más plazo, más coste y mayor impacto ambiental.

En el caso de estaciones de metro subterráneas es habitual que la estructura de contención forme parte de la caja estructural definitiva, de manera que conforme un cerramiento perimetral resistente y una barrera frente al agua. Al tener un carácter permanente, no se trata de un medio auxiliar, sino que pasa a ser un componente estructural con una vida útil larga.

2.3.2.1. Tipología de contención empleada en estaciones de metro.

Existen diferentes tipologías de contención utilizadas en estaciones de metro.

Algunos de los aspectos que intervienen en la elección de la tipología empleada son:

- Geotecnia.
- Profundidad.
- Nivel freático.
- Entorno urbano.
- Función estructural.
- Plazo.

Las pantallas continuas de hormigón armado son una solución frecuente en estaciones profundas. Se ejecutan por paneles o bataches, normalmente con cuchara bivalva o hidrofresa, y pueden trabajar como elemento definitivo de contención. Su ventaja es que ofrecen elevada rigidez, buena estanqueidad y capacidad para integrarse en la estructura permanente de la estación. Sin embargo, requieren maquinaria especializada, consumo de lodos de sostenimiento, plantas de tratamiento y grandes volúmenes de hormigón y acero. Por tanto, son relevantes para el ACV.

Los pilotes secantes constituyen otra solución habitual para recintos excavados en suelos complejos o con presencia de agua. Se forman mediante pilotes que se solapan parcialmente, alternando pilotes primarios y secundarios. Proporcionan una barrera rígida y relativamente continua, aunque su estanqueidad y continuidad dependen de la ejecución. Los pilotes tangentes o contiguos se diferencian porque los pilotes se tocan o se aproximan sin solape completo; pueden ser adecuados cuando la exigencia de estanqueidad es menor o cuando se complementan con tratamientos del terreno.

Los muros berlineses, formados por perfiles verticales y elementos horizontales de entibación, se utilizan en excavaciones de menor profundidad o en situaciones donde las condiciones de terreno y agua lo permiten. Suelen tener menor consumo de hormigón que una pantalla continua, pero también menor rigidez y estanqueidad. Las tablestacas metálicas pueden ser competitivas cuando existe posibilidad de hinca, extracción y reutilización, aunque su uso en entornos urbanos densos puede verse limitado por vibraciones, ruido, obstáculos subterráneos o condiciones geotécnicas.

Además de los elementos verticales de contención, la estabilidad del recinto suele completarse con anclajes, puntales metálicos, riostras, codales o incluso con las propias losas de la estación ejecutadas en fases intermedias. En el método “top-down” o de excavación bajo cubierta, la losa superior se ejecuta relativamente pronto y pasa a colaborar como elemento de arriostramiento mientras la excavación continúa por debajo. Esta forma de construir puede reducir afecciones superficiales y permitir una mayor restitución urbana, pero también modifica la secuencia de obra, el acceso de maquinaria, la ventilación y la logística interna.

Tabla 3. Sistemas de contención aplicables a estaciones de metro. (Elaboración propia)

Sistema	Condiciones habituales de uso	Implicaciones ambientales principales	Datos de obra relevantes
Pantalla continua de hormigón	Estaciones profundas, alta rigidez, necesidad de limitar deformaciones y controlar agua.	Alto consumo de hormigón y acero; lodos; maquinaria pesada; posible integración como estructura definitiva.	Panel, profundidad, volumen teórico y real, acero, hormigón, lodos, horas de equipo.
Pilotes secantes	Recintos con requerimiento de continuidad y cierta estanqueidad; geometrías complejas.	Consumo elevado de hormigón/acero; perforación repetitiva; posible sobreconsumo por ejecución.	Número de pilotes, diámetro, longitud, solape, hormigón real, acero, consumo de perforación.
Pilotes tangentes o contiguos	Excavaciones con menor exigencia de estanqueidad o complementadas con tratamientos.	Menor continuidad que los secantes; impacto ligado a número de pilotes y armado.	Longitud, diámetro, separación, armado, rendimientos y consumos.
Muro berlinés	Excavaciones menos profundas o con terreno favorable; soluciones provisionales.	Menor hormigón, pero mayor dependencia de perfiles, entibación y fases de excavación.	Perfiles, paneles de entibación, anclajes, reutilización de acero, fases.
Tablestacas	Suelos adecuados para hinca y posibilidad de recuperación o reutilización.	Potencial de reutilización del acero; impactos por hinca, vibración y transporte.	Longitud, peso, número de reutilizaciones, maquinaria de hinca/extracción.

Anclajes y puntales	Complemento de pantallas, pilotes o muros durante la excavación.	Importancia del acero, perforación, inyección y montaje; posibilidad de reutilización en puntales.	Longitud de anclaje, acero, lechada, número de niveles, pesos de puntales.

No existe un sistema de contención ambientalmente óptimo en términos absolutos. La alternativa con menor huella depende de la profundidad, de la geología, del agua, de la posibilidad de reutilizar elementos, de la integración de la contención en la estructura definitiva y de las restricciones urbanas. Un muro más ligero puede parecer favorable por materiales, pero requerir más tratamientos, más bombeos o más sistemas provisionales. Una pantalla más intensiva en hormigón puede resultar adecuada si reduce deformaciones, evita patologías y funciona como elemento definitivo durante toda la vida útil. Por ello, la evaluación debe considerar el ciclo de vida y no solo la cantidad inicial de material.

Desde el punto de vista de los datos, los sistemas de contención tienen una ventaja metodológica importante: suelen estar formados por unidades repetitivas. Por ejemplo, en pantallas la unidad puede ser el panel y en pilotes cada pilote. Esta repetición permite comparar elementos entre sí y detectar desviaciones de consumo, rendimiento o huella. Por ese motivo, los sistemas de contención son candidatos adecuados para análisis granular cuando se dispone de registros de ejecución.

2.3.3. Elementos dominantes de la huella de carbono en la estación.

La revisión de la literatura permite identificar un patrón común: en estaciones subterráneas, el peso principal de la huella de carbono suele concentrarse en materiales estructurales, especialmente hormigón y acero.

El hormigón es relevante por el volumen utilizado en contención, losas, muros y cimentaciones internas. Su huella depende de la dosificación, del contenido de cemento, de la resistencia, de las adiciones, de la planta suministradora y del transporte. El acero de armadura es relevante por su intensidad de carbono y por las cuantías necesarias en elementos sometidos a fuertes empujes, grandes luces o requisitos de fisuración. En España, la existencia de DAP de fabricantes permite mejorar la representatividad del dato frente a factores genéricos, siempre que se identifique el suministrador real.

La excavación y gestión de tierras puede no tener siempre el mayor peso porcentual, pero sí es un elemento crítico en estaciones urbanas por la cantidad de material movilizado y por su dependencia de la logística real. Distancias de transporte, congestión, tipo de camión, necesidad de acopios intermedios, destino final y posibilidad de reutilización condicionan las emisiones. Además, el transporte de tierras es un buen ejemplo de proceso que puede quedar simplificado en fase de proyecto y que solo se conoce con precisión a partir de datos de obra.

En términos de gestión ambiental, estas emisiones son valiosas porque algunas pueden corregirse durante la obra: optimizando secuencias, reduciendo esperas, ajustando bombeos, mejorando logística o sustituyendo equipos por alternativas eléctricas cuando sea viable.

Dependiendo de los métodos constructivos empleados en la construcción de la estación, puede haber una gran variabilidad en las emisiones de carbono emitidas.

Dentro de la ejecución de una estación de metro, el movimiento de tierras es una parte importante. En ella, el transporte por carretera es la fase que más

influencia tiene (en cuanto a las emisiones de carbono) dentro de la parte de la excavación. Un ejemplo real publicado en 2024, durante la ejecución de una obra en Beijing, China, determinó que hasta el 40,50% de las emisiones totales producidas durante la excavación eran originadas por el transporte por carretera (Chongxi & Zhang, 2024). En el cálculo estático es muy complicado prever los valores reales del transporte de tierras, cualquier cambio se traduce en una desviación importante en los resultados.

Una referencia de interés que guía sobre esta cuestión es la publicación de Mei. Centra su estudio en el análisis de diferentes alternativas de ejecución en estaciones de metro (siempre desde la perspectiva de las emisiones de carbono). Justificando que hay una diferencia importante en la producción de emisiones, en función del método de ejecución elegido (hasta un 13,77% según método de excavación). Por ello, los datos del cálculo estático son solo una simple referencia inicial que no debe tenerse en cuenta como valor final. Un simple cambio en la forma de ejecutar la estación durante la fase de obra debe ser considerado, de lo contrario las diferencias resultantes serán muy significativas (Mei et al., 2024).

Por tanto, desde una perspectiva de ACV aplicada a estaciones de metro, los elementos prioritarios no deben seleccionarse únicamente por volumen o coste, sino por una combinación de tres criterios: peso potencial en la huella, incertidumbre del dato y capacidad de trazabilidad. Un elemento con mucho hormigón y acero es relevante por peso. Un proceso con consumos muy variables es relevante por incertidumbre. Y un elemento con registros repetitivos de obra es relevante porque permite construir modelos de análisis, validación y predicción.

2.3.4. Granularidad del análisis: del conjunto de estación al elemento constructivo.

Una limitación frecuente de los estudios de ACV en infraestructuras es el nivel de agregación. Muchos trabajos presentan resultados por línea, por kilómetro, por estación o por capítulo de obra. Estos resultados son útiles para comparar alternativas generales, pero no permiten identificar qué elementos concretos explican las desviaciones. En una estación, dos zonas con la misma superficie pueden tener huellas muy distintas si cambian la profundidad, el terreno, la cuantía de armadura, el método de excavación o la logística de transporte.

El análisis granular busca reducir esa pérdida de información. En lugar de calcular únicamente una huella global de estación, descompone la obra en unidades constructivas comparables: paneles, pilotes, losas, fases de excavación, hormigonados o tajos. Esta descomposición permite comparar elementos semejantes, detectar consumos anómalos y relacionar la huella con variables técnicas. En términos de inteligencia artificial, la granularidad es fundamental porque los modelos de aprendizaje automático necesitan observaciones repetidas para aprender patrones.

El enfoque granular también permite conectar el ACV con la gestión de obra. Si la huella se calcula solo al final, el resultado sirve para informar, pero tiene poca capacidad de corrección. Si se calcula por unidad constructiva y durante la ejecución, puede convertirse en una herramienta de control. Esta idea conecta con marcos como PAS 2080 y con la tendencia reciente hacia sistemas de gestión activa del carbono, en los que el dato ambiental deja de ser un resultado retrospectivo y pasa a ser un indicador de gestión.

La huella de carbono de una estación de metro no depende de un único elemento constructivo. Los sistemas de contención, la excavación, las losas principales, la estructura interior y la gestión de tierras forman un conjunto interdependiente que debe analizarse desde una perspectiva de ciclo de vida. En términos generales, el hormigón y el acero concentran la mayor parte del carbono embebido, mientras que los procesos de obra, especialmente excavación, transporte, maquinaria y sistemas auxiliares, introducen una variabilidad significativa entre el ACV de proyecto y el ACV real.

2.4. Inteligencia artificial

Para comprender como pueden emplearse técnicas basadas en inteligencia artificial se debe conocer el origen y evolución de esta.

2.4.1. Fundamentos y evolución histórica de la inteligencia artificial

La definición actualiza de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) expone que un sistema de IA es un sistema basado en máquinas que, para objetivos explícitos o implícitos, infiere, a partir de la entrada que recibe, cómo generar salidas como predicciones, contenido, recomendaciones o decisiones que pueden influir en entornos físicos o virtuales (OECD, 2024) . Es decir, son sistemas computacionales que a partir de unos datos de entrada son capaces de interpretarlos, encontrando patrones o relaciones y que son competentes para generar resultados orientados al cumplimiento de objetivos. Estos sistemas pueden presentar distintos niveles de autonomía y adaptabilidad.

Dentro de este ámbito conceptual, el aprendizaje automático (*Machine Learning*, ML) constituye una rama de la inteligencia artificial en la cual las

máquinas aprenden a partir de la experiencia, es decir, de los datos. En ella, no es necesario programar ninguna regla de decisión. El propio algoritmo encuentra patrones y relaciones entre los datos, hecho que le capacita para predecir resultados. Su empleo sirve para anticiparse a problemas.

Además del Machine Learning (ML), hay otras disciplinas que también son importantes en el ámbito de la ingeniería civil. Por ejemplo, la visión por computadora (Computer Vision, CV), el procesamiento del lenguaje natural (Natural Language Processing, NLP) y la robótica autónoma.

Existen otras disciplinas que son importantes para la ingeniería civil, como son la visión por computadora (Computer Vision, CV), el procesamiento del lenguaje natural (Natural Language Processing, NLP) y la robótica autónoma. Estás últimas no son abordadas en este trabajo.

Otra disciplina de IA que es necesario nombrar es el Deep Learning (DL). Permite procesar grandes volúmenes de datos empleando redes neuronales profundas. Presenta una desventaja frente a los modelos de ML. Su gran opacidad, conocida como ‘’caja negra’’. Al emplear cientos de millones de parámetros es complicado entender los razonamientos del modelo para entregar los resultados. Por el contrario, los modelos ML (por ejemplo, los árboles de decisión, Random Forest) admiten formas razonables de explicación mediante coeficientes, reglas de decisión o técnicas de explicabilidad como los valores SHAP (Lundberg & Lee, 2017).

La contribución de estos valores en la explicación de los resultados entregados por los ML se expondrá más adelante. A partir del conocimiento de las ventajas y desventajas de emplear un tipo de algoritmo se podrán elegir que modelos son más adecuados en el ámbito

de la gestión de la huella de carbono en construcción. Se debe tener en cuenta lo que señala la ISO 14044:2006, que exige una trazabilidad, documentación y revisión sobre los resultados en las emisiones de carbono.

2.4.1.1. Hitos históricos: del programa de Dartmouth a los modelos generativos

En general sobre cualquier tema es complicado marcar cual fue el hito o momento que supuso el comienzo. Sin embargo, en IA es de consenso elegir el ensayo realizado por Alan Turing (1950). Turing lanzaba la pregunta ¿Pueden pensar las máquinas? Y en lugar de buscar respuesta a esta pregunta, proponía reemplazarla por una prueba, hoy es conocido como Test de Turing. Este test pretende evitar los problemas filosóficos sobre la definición de inteligencia y en su lugar propone una verificación empírica del comportamiento.

El Test de Turing fijó dos elementos que han dado estructura a la disciplina durante los últimos setenta años. El primero, la inteligencia se evalúa por sus manifestaciones externas y no por la naturaleza del sistema que produce la respuesta. El segundo elemento, el aprendizaje es el camino para alcanzar comportamientos inteligentes.

El término de inteligencia artificial fue acuñado en el verano de 1955, John McCarthy, Marvin Minsky, Nathaniel Rochester y Claude Shannon organizaron en el Dartmouth College una escuela de verano. En ella lanzaron un programa de investigación con una propuesta que sigue estando vigente (McCarthy et al., 1955/2006): ’’todo aspecto del aprendizaje o cualquier otra

característica de la inteligencia puede, en principio, ser descrito con la suficiente precisión como para que una máquina lo simule''.

Más adelante, en el periodo comprendido entre 1956 y 1973, se desarrolló una competición entre dos paradigmas. El paradigma simbólico-conexionista. Es de interés parte la conexionista, desarrollada por el perceptrón de Rosenblatt Rosenblatt (1958). El perceptrón era un modelo computacional que era diseñado como si fuera un cerebro biológico. Fue el primer antecedente de las redes neuronales modernas.

El perceptrón de Rosenblatt fue duramente criticado por tener limitaciones por los matemáticos Minsky y Papert. Solo podía aprender con datos que presentaran separaciones sencillas (como una línea recta o un plano) pero cuando los datos tenían relacionas más complejas no funcionaba. Este supuso una crisis en el campo de la IA, y la financiación se redujo. En el año 1973, el informe Lighthill (1973), que fue encargado por el Consejo de Investigación Científica del Reino Unido, llegó a la conclusión que la IA había fracasado en el cumplimiento de sus promesas de los años cincuenta. Se recomendada la cancelación de la financiación pública para investigar la IA. A está época se la conoce como el invierno de la IA. esto provocó una reducción significativa de las inversiones dando lugar a lo que se conoce como invierno de la IA.

En la década de 1980, la investigación en IA avanzó gracias los llamados sistemas expertos (MYCIN, XCON, R1). Estos sistemas intentaban imitar el razonamiento humano, a través de condiciones. ''Si ocurre esto, entonces haz esto''. Estos sistemas podrían emplearse en la configuración de equipos informáticos de la época o en algunos procesos industriales. El problema surgía cuando había alguna situación que no estaba prevista, a priori, en las

reglas. En consecuencia, el sistema fallaba. Está limitación se la denominaba ‘’cuello de botella del conocimiento’’.

En el comienzo de los años 90 volvió a haber una crisis de paradigma. Es conocido como ‘’segundo invierno de la IA’’. En el mismo se llegó incluso a replantear el término de IA. El problema era que los ambiciosos objetivos que se proponían resolver con la IA, no se conseguían. Como resultado, algunos sectores proponían incluso el cambio de nombre. Los sistemas de esos años eran caros de construir y difíciles de mantener. Si había situaciones no previstas dejaban de funcionar.

En el segundo período de la década de los 90, 1995-2010, se avanzó en el aprendizaje automático estadístico. Ya no se necesitaban programar reglas manuales, los modelos comenzaron a aprender a partir de datos. Hubo varias aportaciones destacables: las máquinas de vectores de soporte (SVM) desarrollados por Vladimir Vapnik, el algoritmo de bosques aleatorios (Random Forest) determinado por Breiman (2001) y el avance progresivo en el campo de las redes neuronales. Además, las mejoras en el hardware permitieron disponer de una mayor potencia de cálculo que era necesaria para poder ‘’ejecutar’’ los modelos.

El año 2012 es una fecha importante, marcó un punto de inflexión en el avance del aprendizaje profundo (DL). En primer lugar, la red neuronal llamada AlexNet (Krizhevsky et al., 2012), supuso un punto de inflexión. Consiguió demostrar que las redes neuronales profundas funcionaban muy bien y superaban a los métodos tradicionales en el reconocimiento de imágenes. Para ello se necesitaban grandes cantidades de datos etiquetados y una potencia de cálculo suficiente. En este ámbito, un dato etiquetado es

aquel al que se le ha añadido la respuesta correcta. Un dato como puede ser la ‘’imagen de un gato’’ lleva la etiqueta de ‘’gato’’.

Tres años más tarde, en 2015, se publicó en Nature (LeCun et al., 2015) un artículo que fortaleció el deep learning (en adelante DL) como modelo dominante de referencia. Su publicación sirvió para avanzar en aplicaciones de visión por computadora, reconocimiento de voz, traducción automática y generación de contenidos.

Finalmente en 2017, se desarrolló la arquitectura Transformer presentada por Vaswani et al. (2017). Ella constituye la base de la inteligencia artificial moderna, empleada en los grandes modelos de lenguaje (LLMs) como ChatGPT, Gemini o Claude. Los Transfomer rompieron las limitaciones de las redes neuronales existentes hasta la fecha. Hasta la fecha los modelos existentes presentaban un mecanismo secuencial, es decir, los modelos que usaban texto leían las frases palabra por palabra. Sin embargo, los Transformer introdujeron el concepto de auto-atención. Consiste en que el modelo es capaz de leer y analizar las relaciones entre todo el conjunto de datos, sin ir de forma secuencial.

El último gran hito en la historia de la IA fue en 2022. Se presentó GPT-3 por el equipo de OpenAI (Brown et al., 2020) que marcó otro gran avance en IA frente a la publicación de los Transformes antes mencionada. Se presentó un modelo con 175 mil millones de parámetros, que era capaz de resolver múltiples tareas de procesamiento de lenguaje natural sin necesidad de entrenamiento específico. El avance consistió en el salto de escala. Se demostró que un gran modelo unido a una capacidad de computación masiva permitía que una IA se adaptara a ejecutar nuevas funciones de forma automática. Hecho que es similar a lo que hace el cerebro de los humanos.

Tabla 4. Hitos en la evolución de la inteligencia artificial. (Elaboración propia)

Año	Hito	Detalles
1950	Test de Turing y planteamiento del problema de la inteligencia artificial	Origen conceptual del campo; principio de evaluación operacional
1955	Conferencia de Dartmouth — fundación formal de la disciplina	Acuñación del término IA
1958	Perceptrón de Rosenblatt — primer modelo conexionista	Antecedente de redes neuronales modernas
1969–1973	Crítica de Minsky y Papert e informe Lighthill — primer invierno IA	Origen del retraimiento del enfoque conexionista
1980s	Sistemas expertos basados en reglas (MYCIN, XCON)	Antecedente de IA auditable basada en reglas
1995–2010	Consolidación del ML estadístico (SVM, Random Forest, Isolation Forest)	Algoritmos directamente empleados en este trabajo
2012	AlexNet — irrupción del deep learning	Cambio de paradigma
2015	Síntesis del deep learning en Nature	Consolidación del DL como paradigma dominante
2017	Arquitectura Transformer — base de los grandes modelos de lenguaje	Habilita IA generativa contemporánea
2022–presente	Modelos generativos de propósito general (CHATGPT, GEMINI, CLAUDE)	Contexto disciplinar

2.4.1.2. Taxonomía de técnicas de aprendizaje automático

Los procesos del aprendizaje automático se clasifican en tres grandes familias. Obedeciendo a la naturaleza de la información que tienen disponible durante el entrenamiento (Jordan & Mitchell, 2015).

1. Aprendizaje supervisado. el cual dispone de pares entrada-salida que están etiquetados y aprende y resuelve con una función que minimiza los errores entre las predicciones del modelo y las etiquetas reales. Ejemplos: Random Forest Regressor, Gradient Boosting XGBoost y LightGBM.
2. Aprendizaje no supervisado. El modelo solo dispone de las entradas y debe analizar los datos y descubrir una estructura en ellos sin tener guía explícita. Por ejemplo: el clustering por particiones (K-Means), agrupamiento jerárquico, modelos basados en densidad (DBSCAN) y detección de anomalías (Isolation Forest).
3. Aprendizaje por refuerzo. Es aquella rama de la IA donde el propio sistema aprende a tomar decisiones óptimas mediante la interacción con un entorno, todo ello se basa en recompensas y castigos. El sistema es capaz de enfatizar y dar más valor a aquellas acciones que generan resultados positivos.

Algunos de los aspectos que deben tenerse en cuenta en la elección del algoritmo son:

- Precisión predictiva.
- Eficiencia y gasto de computación.
- Capacidad para detectar el ruido en los datos.
- Madurez tecnológica.

2.4.2. La inteligencia artificial en el sector de la construcción

El sector de la construcción, especialmente la obra civil, presenta unas características específicas, a partir de las cuales se puede explican los principales motivos por los que la adopción de la IA es más lenta que en otros sectores (industria, servicios financieros, telecomunicaciones). Entre las principales destacan:

- Elevada fragmentación de la cadena de valor. La ejecución de proyectos únicos muy diferentes entre sí y con entornos de trabajo en ubicaciones dispares es una característica significativa (Regona et al., 2022).
- Cultura empresarial tradicional. Las empresas presentan fuertes resistencias al cambio y a la introducción de novedades tecnológicas.
- Falta de datos digitalizados. Los modelos de IA que se emplean en la predicción de patrones necesitan un gran número de datos digitalizados. La construcción recoge y recopila datos para cumplir con los procedimientos de calidad y administrativos. Pero no aplica para datos de producción. Además, le falta poseer equipos multidisciplinares formados no solo por profesionales de la ingeniería civil sino también por profesionales con competencias en la ciencia de datos.

En los últimos años, puede apreciarse un intento de modernización y digitalización con la implantación de la metodología BIM, los sensores IoT (Internet of things, dispositivos que conectados a Internet toman automáticamente datos y los envían a un ordenador para su procesamiento) y la telemetría de maquinaria.

2.4.2.1. Cronología de la adopción de la IA en construcción

La adopción de la IA en construcción se puede clasificar en 4 períodos. Estos presentan ciertos solapes y están relacionados con la evolución de la disciplina.

La primera fase, ocuparía el periodo entre 1985 y 1995. En ella aparecieron los primeros sistemas expertos que se aplicaban a problemas, como la planificación de obras, la estimación inicial de costes. Con menor peso al diseño geotécnico. Un sistema experto se basa en que técnicos con amplios conocimientos en su campo, programan mediante reglas lógicas (si ocurre esto haz esto). Los sistemas no aprendían de los datos, como en la actualidad, sino que aplicaban reglas previamente definidas. Su principal valor, fue pedagógico al introducir en la ingeniera civil la idea de poder emplear un razonamiento automático. Prácticamente no se pasó de prototipos, tuvieron una baja implantación. que no llegaron a implantarse (Levitt & Kartam, 1990).

La segunda fase, estaría comprendida entre los años 1995 y 2010. Los sistemas expertos fueron desplazándose lentamente por el ML estadístico. Este se comenzaba a aplicar en la resolución de problemas con un claro componente predictivo. Ejemplos de uso fueron la estimación de plazos y costes a partir de datos históricos como se refleja en las primeras revisiones sobre IA en ingeniería civil (Adeli, 2001). En paralelo comenzaron a realizarse los primeros estudios de predicción de consumo energético en edificios.

El principal avance de este periodo fue comprobar si realmente funcionaban, para ello se fijaban métricas comunes para comparar modelos. Como el MAE (Error medio absoluto entre el valor real y el valor predicho) o el RMSE (error medio cuadrático) que miden el tamaño medio del error. También se empleó el R2 (coeficiente de determinación) que indica que parte de la variación de los datos consigue explicar el modelo. Un obstáculo importante fue la baja

digitalización de las obras que implicaba la inexistencia de bases de datos históricas completas y fiables.

La tercera fase, comienza hacia 2010 y aún no se puede dar por completada. En ella hay tres tendencias que están transformando la aplicación del ML en construcción.

1. La **metodología BIM** (Building Information Modelling) (National Institute of Building Sciences, 2015). Esta plantea una colaboración multidisciplinar en un entorno común de datos. Puede aplicarse a todo el ciclo de vida de los proyectos y obras. Se basa en bases de datos con información gráfica georreferenciada e información alfanumérica asociada.
2. La proliferación de **sensores IoT** (Internet of Things) de bajo coste para la maquinaria y trabajadores y su empleo en obras, tal como se recoge en el artículo de Rao et al. (2022). Estos sensores son capaces de recoger en tiempo real una importante cantidad de datos y enviarlos a plataformas que los analizan. Permiten incluso la monitorización de la salud de los trabajadores.
3. La aplicación del **aprendizaje profundo o deep learning** (DL). Este avance ha hecho posibles aplicaciones que detectan EPIS (equipos de protección individual) mediante la colocación de cámaras en obra. También puede llegar a reconocer actividades que ejecuta la maquinaria. Una revisión para tener en cuenta es la propuesta por Akinosho que ofrece una recopilación exhaustiva sobre la implementación de DL a lo largo de la historia de la construcción (Akinosho et al., 2020).

La cuarta fase, comienza hacia 2020 y se está consolidando. Es una mezcla de varias áreas dentro de la IA. Por una parte, llegan los Grandes Modelos de Lenguaje (LLM), también conocida como la inteligencia artificial generativa.

Con ella se profundiza en la interpretación y análisis de pliegos de prescripciones. También asiste en la redacción de proyectos, consulta y aplicación de normativa técnica. Siendo el lenguaje natural la forma usada como interface. En esta etapa comienzan a desarrollarse y a emplearse los Gemelos Digitales (DT) que son representaciones digitales de activos físicos que pueden actualizarse incluso en tiempo real. Una definición especialmente apropiada es la publicada por Shen et al. (2022). Los define como un conjunto de información digital que representa virtualmente los atributos físicos estáticos, los estados dinámicos y los procesos del entorno construido. Afirmando que un DT es un modelo vivo de un activo que se adapta continuamente a los cambios del entorno o en su funcionamiento.

La Construcción con Gemelos Digitales (DTC) es un nuevo modo de gestionar la producción en la construcción. Puesto que aprovecha la recopilación de datos de distintas fuentes de tecnologías de monitorización con otras funciones de IA. Proporcionando una información precisa con la que tomar decisiones (Sacks et al., 2020). Gracias a los Gemelos Digitales, los ingenieros pueden predecir el rendimiento de una infraestructura sin haberla construido. También pueden emplearse para adelantar el envejecimiento de los activos, pudiendo mitigar su avance y alargar su ciclo de vida.

Durante esta etapa, se comienza a realizar una captura digital de datos de forma masiva. Hecho que con el empleo de la IA facilitará la extracción de patrones. Facilitando la toma de decisiones en menor tiempo y con mayor acierto.

2.4.2.2. Revisión de las principales áreas funcionales de aplicación de la IA en construcción.

Para conocer las principales áreas donde se ha aplicado la IA en construcción es necesario realizar un estudio revisando cientos de publicaciones académicas, que es justo lo que hicieron Pan y Zhang. Los autores analizaron miles de publicaciones académicas, identificando la evolución desde los sistemas expertos hasta el aprendizaje profundo (Pan & Zhang, 2021). Hay seis grandes áreas donde se ha aplicado la IA, se muestran algunos ejemplos:

1. Seguridad y gestión de riesgos: empleo de visión computacional para comprobar el empleo de EPIS.
2. Salud estructural e inspección de infraestructuras: monitoreo de infraestructuras para detectar grietas u otros defectos.
3. Gestión y eficiencia energética: aplicada en las fases de mantenimiento pronostica la demanda de electricidad o calefacción en edificios de todo tipo.
4. Planificación y logística: automatiza la distribución de recursos humanos y de maquinaria según las necesidades.
5. Diseño estructural y BIM: optimiza el diseño al simular estados de carga con las dimensiones de cerchas.
6. Geotecnia y construcción subterránea: análisis de riesgo de colapso por excavaciones.

Líneas futuras por considerar serían:

1. La robótica inteligente.
2. El empleo general de Gemelos Digitales.
3. Impresión 4D.
4. Blockchain.

Dentro del largo camino que quedaría por recorrer estaría la búsqueda de aplicaciones de IA que aumenten la productividad.

Otra forma de clasificar los usos de IA en la construcción obedece a sus usos dependiendo de la fase del proyecto. Esta clasificación es la planteada por Regona et al. (2022).

Fase de planificación 1:

- **Programación automatizada:** Uso de analítica predictiva para prever riesgos de retrasos, basándose en datos históricos.
- **Gestión de riesgos y costos:** Empleo de modelos predictivos y redes neuronales para pronosticar con precisión los costos del proyecto.
- **Análisis de seguridad proactivo:** La visión artificial y el reconocimiento de patrones permiten identificar condiciones inseguras en las fotos y videos de la obra.

Fase de Diseño:

- **Diseño generativo:** Aplicaciones que exploran automáticamente miles de alternativas de diseño.
- **Optimización de BIM:** La IA ayuda a gestionar grandes cantidades de datos en modelos digitales.
- **Detección de colisiones:** Tecnologías que identifican conflictos entre diferentes disciplinas de diseño en tiempo real.

Fase de Construcción:

- **Robótica específica para tareas:** Uso de robots para actividades como carga de materiales.

- **Maquinaria y vehículos autónomos:** Implementación de excavación autónoma y vehículos aéreos (drones) que trabajan conjuntamente. Apoyados en Gemelos Digitales pueden monitorear el progreso.
- **Monitoreo mediante sensores y cámaras:** Procesamiento de imágenes en tiempo real para rastrear la actividad de los trabajadores. También aplicables a la seguridad estructural de edificios o cualquier infraestructura.

Hay un largo camino para mejorar la implantación de la IA en construcción, siendo obligado superar las siguientes barreras:

- Naturaleza de la industria y los proyectos: El sector está muy fragmentado, hay múltiples agentes, es quizás la mayor resistencia. Además, los proyectos únicos, complejos y no repetitivos. Esto dificulta la estandarización y la automatización de trabajos repetitivos. Otro problema, es el emplazamiento de las obras, que están bajo diferentes regulaciones locales.
- Desafío con los datos: Los algoritmos de IA necesitan grandes volúmenes de datos para ser precisos. Recopilar estos datos en construcción es costoso. Además, la información no está estructurada.
- Barreras de conocimiento y altas inversiones: Existe una gran carencia de personal con habilidades técnicas y conocimientos sobre IA aplicada a la construcción. Las empresas valoran en millones de euros las inversiones necearías sin poder tener certeza en el retorno de las inversiones.
- Factores culturales: Es uno de los sectores donde existe una mayor resistencia al cambio.

Tabla 5. Resumen de las áreas de aplicación de la IA en la construcción según los artículos comentados. (Elaboración propia)

Área funcional	Tareas representativas	Madurez aplicada
Planificación y control	Estimación de plazos, optimización de cronogramas, predicción de retrasos, gestión EVM	Alta
Estimación de costes	Predicción de coste a partir de cuantías, modelos paramétricos, control presupuestario	Alta
Seguridad en obra	Detección automática de EPI, prevención de caídas, monitorización de zonas de riesgo	Alta
Calidad estructural	Inspección automática de defectos, control de hormigón, ensayos no destructivos	Media-alta
Mantenimiento predictivo	Predicción de averías de maquinaria, optimización de la flota	Media
Reconocimiento de actividades	Identificación automática del estado operativo de equipos a partir de IMU, audio o vídeo	Media
Sostenibilidad ambiental	Estimación de emisiones, predicción de consumos energéticos, ACV asistido por IA	Media-baja
IA generativa	Asistencia a redacción técnica, interpretación de pliegos, consulta de bases de datos	Baja (emergente)

2.4.2.3. Adopción de la IA en la obra pública española

En España, las obras de metro son de promoción pública. La adopción de IA en la obra pública española es prácticamente inexistente. Se espera un desarrollo lento y gradual, al igual que ha ocurrido con otras tecnologías que se incorporaron anteriormente.

Existen tres factores que condicionan y van a impulsar el empleo de la IA en la obra pública.

El primer factor, es la concentración de grandes inversiones de infraestructuras urbanas en manos de un pequeño grupo de empresas-promotores públicos. Adif, Metro Madrid, FGV (Ferrocarrils de la Generalitat Valencina) o TMB (Transportes Metropolitanos de Barcelona). Este hecho es destacable porque facilita la organización, estructura, trazabilidad y recopilación de los datos. De ello también podrían beneficiarse investigadores independientes al ser los datos públicos.

El segundo factor, recientemente se han publicado desde la Dirección General de Carreteras las Órdenes Circulares 3/2024 (Dirección General de Carreteras, 2024a) y 5/2024 (Dirección General de Carreteras, 2024b). La Dirección General de Carreteras pertenece al Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. La Orden Circular 3/2024 es significativa en el ámbito de las emisiones de carbono al aprobar los criterios para el cálculo de la huella de carbono de las secciones de firme y formación de explanada. Especifica que el cálculo abarcará las etapas de producto (A1, A2, A3) y la etapa de construcción (A4 y A5). En su apartado tercero, establece que en algunos proyectos de carreteras ‘’será preceptivo el cálculo de la huella de carbono’’ utilizando valores estimados del anejo o debidamente justificados. Por último, en el apartado cuarto define el ámbito de aplicación, indicando la obligatoriedad para aquellas obras con una superficie de firmes (nuevos o rehabilitados) igual o superior a 10.000 m^2. En nuestro país, muchos de los avances e introducción de nuevas tecnologías se impulsan públicamente con normas que obligan. Esta Orden, abre el camino para el cálculo obligado de

huella de carbono que, a su vez, trae implícito un uso de IA para obtener predicciones.

La Orden Circular 5/2024 no tiene una relación directa con la implantación de la IA, pero si secundaria. En ella se promueve el uso de la metodología BIM en los contratos de construcción. Aprobando el sistema de clasificación RECclass. Este sistema tiene como objetivo garantizar una estructura homogénea y estandarización de la información. Es decir, todos los agentes de un contrato (promotor, proyectista, contratista, subcontratas, asistencia técnica y conservación) nombran de la misma forma a los elementos (archivos, objetos BIM, informes, etc) del proyecto dentro del entorno BIM. Esto facilita la transferencia fluida de datos e información entre todos los agentes y durante todo el ciclo de vida de la infraestructura. Está dentro del Plan de digitalización de la Dirección General de Carreteras y ha sido desarrollada bajo la coordinación de la Subdirección General de sostenibilidad e Innovación. Uno de los principales requisitos para comenzar a adoptar la IA, es contar con un número muy elevado de datos digitales. Por ello, la Orden Circular 5/2024 tiene gran importancia, siendo un primer paso para el impulso de la IA.

El tercer factor es la consolidación del estándar BIM en proyectos de licitación pública a través del Plan BIM en la Contratación Pública, aprobado por la Orden PCM/818/2023 (2023). De nuevo, impulsa la gestión de la información y la calidad de los datos recopilados durante todo el ciclo de vida de la infraestructura.

Un ejemplo sobre la escasa implantación de la IA en construcción en España es la ausencia de publicaciones técnicas o científicas. Entre las escasas publicaciones que se pueden encontrar, está el análisis que hizo Usobiaga

intentando identificar las principales barreras de su adopción (Usobiaga et al., 2025). De nuevo se detalla que uno de los factores más relevantes es la disponibilidad y calidad de los datos. Por ello, cualquier normativa, como las referidas al principio del apartado, que promueva y organice la estandarización y registro de los datos representa un fuerte impulso.

La Plataforma Tecnológica Española de Construcción (PTEC) publicó un informe sobre el impacto de la IA en el sector (PTEC, 2024). El documento analiza cómo podría transformase la construcción con la implantación de la IA. Expone varios ejemplos de proyectos piloto promovidos por empresas privadas y/o en colaboración con organismos públicos. Estos proyectos piloto abarcan posibles casos de uso como gestión de residuos (Proyecto AVANRES), predicción del comportamiento del terreno en excavación de túneles (Proyecto PREFEX), riesgos y avances en obra en tiempo real (Proyecto EDIFITECH).

2.4.3. Inteligencia artificial aplicada a la sostenibilidad de infraestructuras

En 1987 las Naciones Unidas, mediante la comisión Brundtland, definió la sostenibilidad como ‘’Aquello que permite satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades propias’’ (World Commission on Environment and Development, 1987).

La definición de sostenibilidad más cercana a la construcción se obtiene revisando la ISO 15392:2019 (International Organization for Standardization, 2019c). Esta norma indica que la sostenibilidad aplicable a edificios, obras de ingeniería civil y otros tipos de obras de construcción, se concibe como la

contribución de las obras de construcción al desarrollo sostenible durante todo su ciclo de vida.

Desde esta perspectiva, el empleo de la inteligencia artificial ha experimentado un crecimiento notable durante los últimos años. Impulsado por:

- La disponibilidad de un mayor número de datos digitales.
- La colocación de sensores.
- La necesidad de reducir la producción de emisiones y mejorar su estimación.

Akinosho et al. (2020) señalan que las técnicas de aprendizaje automático se han utilizado para apoyar la predicción de consumos energéticos, la estimación de emisiones y el apoyo en la toma de decisiones ambientales. Este desarrollo de las aplicaciones se apoya en la posesión de datos digitalizados, paso previo e imprescindible.

Hay numerosos estudios y publicaciones que recogen ejemplos de la integración del aprendizaje automático en los procesos del ciclo de vida. Ghoroghi presentó una excelente revisión bibliográfica realizada tomando como fuente 81 estudios relevantes publicados entre los años 2000 y 2021 sobre la sostenibilidad en construcción (Ghoroghi et al., 2022). En las publicaciones revisadas por Ghoroghi se analiza el papel representado por los métodos ML en el ACV. Llegándose a la hipótesis de que el ACV apoyado por ML y datos dinámicos permiten evaluaciones más precisas. En consecuencia, se pueden tomar mejores decisiones ambientales.

Hay cuatro líneas tecnológicas que exponen como la introducción de la IA en construcción está ayudando a mejorar la sostenibilidad. Estas son:

- La monitorización en tiempo real mediante sistemas ciberfísicos.
- Los gemelos digitales aplicados al ACV dinámico.
- El reconocimiento automático de actividades de maquinaria pesada.
- El panorama de técnicas de ML utilizadas para la estimación de emisiones.

En los siguientes apartados se expone cada una de ellas.

2.4.3.1. Monitorización en tiempo real y predicción de emisiones: el marco CPS-LSTM

Un trabajo realizado recientemente y que es un perfecto ejemplo de cómo la monitorización en tiempo real (recogida casi instantánea de datos en formato digital mientras la obra se está ejecutando), ayuda a predecir emisiones con el apoyo de la IA es el realizado por Bai et al. (2025). Los autores realizaron un trabajo que integra la monitorización en tiempo real, el aprendizaje profundo (DL) y la gestión de las emisiones de carbono en construcción. Para ello, definieron un sistema formado por tres partes.

La primera parte era un sistema ciber-físico, CPS (Cyber-Physical System) equipado de sensores inalámbricos que capturan y entregan datos de maquinaria de construcción en tiempo real. Utilizando sensores de aceleración y GPS en grúas torre y elevadores.

La segunda parte empleaba IA mediante una red neuronal LSTM, que es un tipo de aprendizaje profundo (DL). La red neuronal está diseñada para trabajar con datos ordenados en el tiempo, como consumos diarios o rendimientos de maquinaria. La función que desempeña es analizar la evolución de emisiones en momentos anteriores para apoyada en los datos en tiempo real, realizar pronósticos de emisiones con una alta precisión. Una

red neuronal es un modelo de IA que se inspira en el cerebro humano para a partir de ejemplos, detectar patrones en los datos.

La tercera parte era un módulo de optimización que recibía los datos del sistema ciber-físico (CPS) y las predicciones de la red LSTM. Con estos datos y empleando un algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas (ACO), se intentaba resolver la toma de decisiones buscando el equilibrio entre tres variables: Velocidad (duración del proyecto), coste e impacto ambiental. Los algoritmos de tipo memoria de hormigas se llaman así porque se inspiran en como las hormigas encuentran el mejor camino hacia la comida. El sistema ACO prueba muchas soluciones posibles y refuerza las mejores encontradas hasta determinar la más eficiente. Funciona de una forma parecida al sistema de rutas de Google Maps.

La importancia del estudio radica en que se desplazó el cálculo de emisiones ACV realizadas de forma estática antes de iniciar la obra a un esquema dinámico basado en datos reales de ejecución. El sistema registró los datos de las grúas torre y otros equipos elevadores con una tasa de un segundo. La red LSTM procesó los datos con una resolución temporal de 10 segundos por muestra.

El módulo ACO identificó la forma de reducir las emisiones en un 23% aceptando un incremento de costo del 5%. Por otra parte, el modelo demostró que acelerar la obra y reducir su plazo en un 12% incrementaba un 3% el costo y aumentaba las emisiones 1%. El sistema iteró hasta mostrar diferentes resultados y su impacto.

Más allá de la alta precisión predictiva, los autores demostraron la capacidad para convertir datos de obra en información útil para mejorar la toma de decisiones en función del desempeño ambiental observado.

La mayor limitación de este enfoque es que la arquitectura LSTM presenta una menor transparencia que los modelos clásicos de IA basados en árboles como Random Forest, que apoyados con valores tipo SHAP, priorizan la trazabilidad metodológica frente al uso de arquitecturas profundas de tipo caja negra. Estos modelos serán revisados en detalle más adelante.

2.4.3.2. Gemelos digitales y ACV dinámico: BLDT

Un Gemelo Digital o Digital Twin (DT) se entiende como la representación digital de un activo físico. El Gemelo Digital se alimenta de datos, estos pueden obtenerse de sensores, modelos BIM y algoritmos de análisis para extraer conclusiones. Pueden emplearse para gestionar infraestructuras a lo largo de todo su ciclo de vida. Este nuevo enfoque o modelo de gestión fue bautizado como Construcción con Gemelos Digitales (DTC) por Sacks et al. (2020). Los autores proponen un sistema de control de ciclo cerrado que integra los modelos BIM con la IA. El DTC emplearía distintos sensores para captar datos en tiempo real sobre el estado de la obra. Con esta información y empleando la IA, se podrían tomar mejores decisiones, así como reducir los desperdicios. Según los autores, gracias a la IA:

- Se interpretan los datos y se realiza un análisis avanzado.
- Se detectan desviaciones.
- La IA calcula diferentes escenarios en función de la información recogida y realiza predicciones.

- Se produce una mejora continua, al emplear los gemelos digitales de proyectos finalizados para entrenar aplicaciones de aprendizaje profundo (DL).

Este nuevo enfoque también puede ser trasladado al área de la sostenibilidad en la construcción. Puesto que conecta información relevante en tiempo real con un módulo de análisis que se plantea diferentes escenarios con el objetivo de ayudar a tomar las mejores decisiones.

Este enfoque de construcción con Gemelos Digitales aplicado a la sostenibilidad fue aplicado por Shen et al. (2022) en un artículo en el que se explica cómo empleando el nuevo enfoque en una edificación, se intentan alcanzar cero emisiones netas de carbono a lo largo de todo su ciclo de vida. Esto demuestra que es posible a través de la integración de herramientas tecnológicas reducir las emisiones.

Una de las claves para que el sistema funcione correctamente pasa por la estandarización de los datos digitales. La industria de la construcción dentro de los modelos BIM, emplea un tipo de ficheros, llamados IFC. Son un estándar internacional para compartir los modelos BIM con toda la información que estos contienen (la información pueden ser características geométricas, coordenadas de georreferenciación, características alfanuméricas como puede ser el tipo de hormigón de una losa). De este modo los distintos agentes implicados en una infraestructura pueden importar o adquirir estos datos independientemente del software que empleen.

Esto tiene una relación directa con la sostenibilidad en la construcción. Shen propuso en su estudio introducir nuevas características en los ficheros IFC

para incorporar los datos capturados por sensores (loT) y poder representar condiciones reales del edificio. Se propone pasar de modelos estáticos a un marco de integración de datos dinámico. Todo ello recogido en un fichero estándar internacional y abierto.

Los conceptos presentados anteriormente fueron integrados como un nuevo sistema de gestión denominado Building Life-cycle Digital Twin (BLDT). En 2025 Petri realiza un trabajo de investigación en el que agrupa todas las tecnologías anteriores para avanzar hacia un marco BLDT (Petri et al., 2025). El BLDT es una metodología muy innovadora que implica la integración de Gemelos Digitales (DT) con equipos dotados de sensores (loT) para transformar el análisis del ciclo de vida (ACV) tradicional, que es estático (al calcularse al inicio del proyecto con datos teóricos iniciales) a un proceso dinámico. El nuevo sistema promueve cambiar las evaluaciones estáticas por un sistema de aprendizaje que se nutre de datos en tiempo real. El objetivo es monitorizar el consumo energético y las emisiones contaminantes. Para probar este nuevo marco de trabajo, se lanzó un proyecto piloto en el puerto de Grimsby. Es un puerto industrial situado en el Reino Unido. Se obtuvieron unos resultados esperanzadores al conseguir reducir el consumo energético un 25% y las emisiones de carbono en un 15%.

El marco BLDT tiene una arquitectura de cinco capas:

1. La primera capa es el Gemelo Digital que actúa como una copia del activo construido y permitirá conectar el modelo BIM con la información captada en tiempo real.
2. Una capa realiza la captura de datos a través de una red de sensores que recogen consumos, rendimientos o funcionamiento de equipos.

3. Una capa semántica, ordena y prepara los datos para darles significado y que puedan ser entendidos por distintos sistemas. Es decir, realiza una estructuración para permitir su interoperabilidad.
4. Una capa incorpora técnicas de ML (modelos de aprendizaje automático) para procesar los datos. Se analizan, se encuentran patrones, se hacen predicciones, actualizando el ACV en tiempo real.
5. Una última capa de visualización entrega los resultados de las simulaciones y de los cálculos dinámicos.

Lo más concluyente del marco BLDT, más allá de los resultados obtenidos, es la demostración de que en un entorno real complejo se pueden realizar mediciones en tiempo real con sensores que permitan obtener un cálculo dinámico del ACV. Con la ayuda de IA se analizan los resultados y se simulan escenarios para optimizar y conseguir unos mejores efectos. Es decir, se demuestra que es posible pasar de modelos estáticos que se basan en unas hipótesis iniciales a arquitecturas que integran datos reales con modelos predictivos en entornos reales. Esto se puede trasladar de un puerto logístico en el Reino Unido a otros contextos de infraestructura como una obra.

2.4.3.3. Reconocimiento automático de actividades de maquinaria pesada

En el entorno de una obra, las emisiones de carbono asociadas a la maquinaria están directamente relacionadas con su actividad, no solo con sus características nominales (como la potencia). Lo ideal sería poder documentar en tiempo real las operaciones realizadas por la maquinaria pesada (excavar, girar, desplazarse o estar en espera) y entregar esta información a un modelo de IA. Este modelo podría calcular el rendimiento real desechando los rendimientos teóricos empleados hasta la fecha. El

resultado tendría una aplicación directa con la sostenibilidad, al permitir tener un mayor conocimiento del ACV dentro del módulo A5 (proceso de ejecución de la obra).

Relacionado con esto, Langroodi presentó un método que denominó Bosque Aleatorio Fraccional (FRF) (Langroodi et al., 2021). Su objetivo era identificar automáticamente las actividades realizadas por maquinaria pesada en obra. El método partía del algoritmo Random Forest, una técnica clásica de aprendizaje automático, y lo mejoraba mediante cálculo fraccional. Se buscaba mantener una buena precisión reduciendo la necesidad de grandes cantidades de datos de entrenamiento.

El algoritmo Random Forest funciona creando varios árboles de decisión y combinando sus resultados para obtener la mejor respuesta. Funciona de la siguiente forma:

- Toma muchas muestras distintas de los datos.
- A partir de cada muestra obtenida crea un árbol de decisión.
- Cada árbol entrega una predicción.
- El resultado final es la combinación de todas las predicciones.

Un árbol de decisión es una forma de clasificar o predecir, dividiendo los datos mediante preguntas simples hasta llegar a una respuesta final. La raíz es la primera pregunta, las ramas las posibles respuestas y las hojas serían el resultado final.

La demostración de Langroodi es relevante porque los modelos de aprendizaje profundo suelen necesitar bases de datos muy grandes para funcionar correctamente. En cambio, el nuevo método FRF consiguió resultados comparables a los modelos de DL utilizando un conjunto de datos

mucho más reducido. En el entorno de la obra donde la captura de datos reales de maquinaria puede ser compleja y conlleva un coste alto, el FRF resulta especialmente interesante.

Queda demostrado que los algoritmos clásicos de aprendizaje automático, como Random Forest, siguen siendo muy útiles en construcción, especialmente cuando no se dispone de grandes volúmenes de datos.

Como en todos los aspectos de una obra, el coste es una barrera importante. Una forma de capturar los datos de la maquinaria con un coste reducido es emplear sensores de medición inercial (IMU, combinan acelerómetros y otros sensores para saber cómo se mueve, gira o se inclina un objeto). Una prueba con este tipo de sensores fue realizada de forma experimental por Molaei et al. (2024). Recopilaron datos de maquinaria de obra con un coste reducido y con los datos entrenaron modelos de Árboles de Decisión (DT) logrando alcanzar precisiones del 99% en los resultados obtenidos.

En construcción se está avanzando hacia una recolección automática de datos que recoge la actividad de la maquinaria. Empleando los modelos clásicos de Machine Learning sin necesidad de emplear modelos de Aprendizaje Profundo pueden obtenerse idénticos resultados. Inicialmente los trabajos van encaminados a conseguir conocer la productividad real de la maquinaria, pero también pueden ser aprovechados para el cálculo del ACV y una mejor toma de decisiones con el fin de mejorar la sostenibilidad.

2.4.3.4. Panorama de técnicas de ML para la estimación de emisiones

Anteriormente se han revisado tecnologías existentes y aplicadas en la monitorización en tiempo real, reconocimiento automático de actividades realizadas por maquinaria y su incorporación a Gemelos Digitales. Todo ello

puede aplicarse a la sostenibilidad, primero calculándose valores de ACV, para posteriormente mediante modelos de aprendizaje automático realizar estimaciones y lanzar diferentes alternativas con el objetivo de reducir sus valores.

Si se realiza una búsqueda de publicaciones que traten sobre estimaciones de emisiones a partir de aprendizaje automático, la mayoría están en el sector industrial, el transporte o la energía. Sin embargo, sus conclusiones son fácilmente trasladables a la construcción. Este trabajo de recopilación de publicaciones fue realizado por Al Nuaimi et al. (2025). Presenta una revisión sistemática de la literatura sobre el uso del aprendizaje automático (ML) para estimar las emisiones de carbono presentes y futuras. Los sectores donde los autores analizan los modelos empleados son el industrial, el de energía y el de transporte. Las publicaciones que analizaron en su estudio detallaban 5 tipos de modelos empleados:

- Redes neuronales artificiales (ANN).
- Métodos de ensamblado (Ensemble Methods).
- Máquinas de vectores de soporte (SVM).
- Máquinas de aprendizaje extremo (ELM).
- Modelos estadísticos de regresión.

También analizaron el empleo de modelos de DL como una evolución de la categoría de Redes Neuronales Artificiales (ANN).

Las conclusiones a las que llegaron después de realizar su revisión bibliográfica fueron las siguientes:

- No existe un modelo perfecto para emplear en el cálculo de las emisiones de carbono.

- La elección del modelo de aprendizaje automático depende de varios factores como el ambiente en el que se aplique, las características de los datos y el equilibrio buscado entre precisión e interpretabilidad. Otro factor destacado son los recursos computacionales.
- Los modelos de ML como Random Forest, XGBoost o LightGBM destacan por su alta precisión y su capacidad para manejar características complejas.
- El modelo Random Forest presenta un gran equilibrio entre precisión y eficiencia computacional, siendo muy adecuado para la predicción de emisiones.
- El uso de valores SHAP (SHapley Additive exPlanation) es una herramienta importante para mejorar la interpretabilidad de los modelos.
- La mejor elección es el empleo de modelos híbridos que combinen las fortalezas de varias técnicas.

Si se traslada al ámbito de la construcción de infraestructuras, el o los modelos de IA elegidos no deben basarse de forma única en la precisión predictiva. Los datos disponibles proceden de distintas fuentes como sensores, albaranes, modelos BIM, mediciones o consumos energéticos. Por ello, serán heterogéneos presentando diferentes niveles de calidad y trazabilidad. La elección de la arquitectura del sistema tendrá la máxima importancia. No debería confiarse en un único modelo, siendo más eficaz combinar varios modelos especializados. El resultado será una mejor identificación de anomalías, detección de patrones e interpretación de resultados.

2.4.3.5. Síntesis comparativa de enfoques IA-sostenibilidad

Tabla 6. Resumen de las principales líneas de aplicación de la IA en la sostenibilidad de infraestructuras revisadas en el apartado. (Elaboración propia)

Referencia	Tecnologías	Aportación metodológica	Limitaciones
CPS-LSTM (Bai et al., 2025)	Sensores IoT + LSTM	Monitorización en tiempo real de maquinaria y predicción de emisiones a corto plazo	Requiere datos continuos de sensores
DTC (Sacks et al., 2020)	BIM, gemelos digitales, captura automática de datos, IA	Propone la construcción con gemelos digitales como sistema de control en bucle cerrado	Marco principalmente conceptual; no se centra específicamente en ACV o carbono
BIM-DT-IFC (Shen et al., 2022)	BIM federado + DT + IFC	Integra BIM y DT para apoyar decisiones de carbono neto cero durante el ciclo de vida	Aplicado principalmente a edificación
BLDT (Petri et al., 2025)	BIM + IoT + ML + ACV operacional	Integra gemelos digitales y ACV dinámico para evaluación ambiental basada en datos reales	Orientado sobre todo a fase operacional; transferencia a fase de construcción requiere adaptación
FRF (Langroodi et al., 2021)	Random Forest, cálculo fraccionario, sensores de maquinaria	Reconocimiento automático de actividades con modelos clásicos	Depende de la calidad de las variables
IMU para ciclos de excavadora (Molaei et al., 2024)	Sensores de tipo inercial (IMU)	Convierte movimientos de maquinaria en datos estructurados	Está validado sólo en excavadoras
Revisión ML-emisiones (Al Nuaimi et al., 2025)	ANN, Métodos Ensemble, SVM	Resume y analiza familias de modelos empleadas en estimar emisiones de carbono	No analiza construcción de infraestructuras

2.4.4. Inteligencia artificial aplicada a la cuantificación y gestión del carbono en construcción

Tradicionalmente, el cálculo de la huella de carbono en construcción (ACV) se basa en unas cantidades teóricas de proyecto (las mediciones de las partidas) a las que se les aplican unos valores de emisión también teóricos. Los valores de emisión proceden de un cálculo previo en función de distancias teóricas de transporte, fichas de fabricantes y rendimientos supuestos. Este enfoque presenta una base metodológica sólida. Sin embargo, presenta una gran limitación al no tener en cuenta el comportamiento real del proceso constructivo. Este contiene una gran variabilidad de procesos y datos. La aplicación de la IA en este enfoque debe ser una herramienta complementaria, tal como puede extraerse, después de realizar una revisión bibliográfica como la realizada por Ghoroghi et al. (2022). Los modelos de aprendizaje automático son útiles en el cálculo del ACV, especialmente en la predicción y gestión de los datos ambientales.

2.4.4.1. Del ACV estático al ACV apoyado por datos reales

El cálculo de ACV aplicado a la construcción, en concreto a la fase A5 se basa en la aplicación de las normas UNE-EN ISO 14040:2006 (AENOR, 2006), UNE-EN ISO 14067:2019 (AENOR, 2019) y UNE-EN 15978:2012 (AENOR, 2012) . Estas normas establecen el marco metodológico en cuatro pasos:

1. Definir el objetivo y el alcance, determinando que se va a evaluar y cuál es la unidad funcional. Suele elegirse una partida del presupuesto.
2. Inventario del ciclo de vida. Recopilan todos los materiales, energía y agua consumidos para su ejecución valorando también los residuos producidos.

3. Evaluación del impacto. Los datos se transforman en indicadores, el más común empleado la huella de carbono.
4. Se obtienen e interpretan los resultados.

El ACV clásico, aunque maduro y consolidado presenta limitaciones. Para conseguir obtener la cifra total de huella de carbono, se realiza sobre supuestos teóricos. Es decir, son cálculos y previsiones estáticas que no tienen en cuenta las condiciones reales de ejecución y los cambios diarios. Emplean bases de datos genéricas cuyos factores de emisión no capturan la variabilidad de cada acción en la obra. En consecuencia, el resultado real podría estar muy lejos del valor calculado inicialmente con las estimaciones.

El cálculo estático es muy útil para estudiar diferentes alternativas en la fase de proyecto. Al establecer una línea base que se puede ir comparando con distintas alternativas del proyecto. De esto modo, ayuda en la toma de decisiones. Sin embargo, la obra real introduce continuamente desviaciones muy difícilmente previsibles. Un ejemplo de ello, son los consumos reales de la maquinaria frente a los consumos teóricos. Estos últimos se obtienen de la ficha del fabricante y expresan unos valores que se obtendrían con unas condiciones de ejecución óptimas muy difíciles de conseguir en la realidad.

La recopilación de los datos de ejecución permite pasar de un cálculo del ACV exclusivamente estático hacia un ACV apoyado y corregido por los datos reales (cálculo dinámico). Los datos reales permiten contrastar las hipótesis y las estimaciones iniciales. Con la información que aportan y su correcta interpretación se pueden identificar y analizar las desviaciones obtenidas. En este último punto es donde entra la IA. Su incorporación a través de modelos de aprendizaje automático de tipo ML se ‘’alimentan’’ con datos reales, aportan una mejora considerable en el cálculo de valores ambientales al

procesar volúmenes de datos complejos y variables. Esto trasladado a la obra, es especialmente relevante al incorporar al cálculo la incertidumbre procedente de todas las variables que intervienen en la obra y que son difícilmente previsibles.

2.4.4.2. Funciones de la IA en la cuantificación del carbono: anomalías, patrones, predicción y simulación

Los métodos de aprendizaje automático (IA) cuando se aplican al cálculo de las emisiones de carbono, en el entorno de construcción, se pueden organizar según la función que cumplen. Lo conveniente no es elegir un algoritmo aislado, si no identificar la pregunta a la que debe responder para poder elegir el idóneo en cada caso.

Atendiendo a la función que cumplen, hay cuatro supuestos.

1. **Detección de anomalías**. Su finalidad es la detección de elementos, jornadas, partidas o procesos cuyo comportamiento ambiental se distingue sobre el patrón medio. En el ámbito de la construcción, una anomalía puede estar relacionada con un consumo más alto de carburante, un rendimiento muy bajo, un volumen de hormigón que supera significativamente el teórico o tiempos de parada de los equipos que superan la media cotidiana. La detección de anomalías consiste en un modelo que de forma automática las detecta y las señala de forma cuantitativa y objetiva frente a la capacidad humana que se ve ampliamente superada con volúmenes de datos grandes y que en muchos casos presenta se apoya en lo subjetivo.
2. **Detección de patrones**. Conocido como clustering. Si la función anterior buscaba excepciones, por el contrario, esta función busca grupos

homogéneos que tienen valores similares respecto a una o más variables. Esto es aplicable tanto a consumos, jornadas de trabajo, paradas de equipos, empleo de medios humanos o de maquinaria, etc. No solo es encontrar los valores medios de variables para clasificar los distintos elementos, si no ayudar en la interpretación de las variaciones que se producen en la obra.

3. **Predicción supervisada**. El modelo a partir de los valores observados es capaz de predecir y anticipar que valores ambientales pueden producirse al ejecutar partidas, elementos o grupos de unidades. Esto permite al equipo de obra anticiparse al valor de huella de carbono que se obtendría y conocer cuáles son los procesos cuyo cambio podría corregir un valor alto de la misma.
4. **Simulación de escenarios**. Esta función es una derivada de las tres anteriores. El modelo será capaz, en base a las condiciones de la obra y los valores experimentados, conocer las relaciones existentes entre los distintos elementos. Con el fin de realizar simulaciones de como la variación del método de ejecución o el empleo de otros materiales afectaría a las condiciones de trabajo y en consecuencia al valor de huella de carbono. El uso del modelo ML no solo es predecir, también es apoyar la toma de decisiones para optimizar la reducción de emisiones.

En una obra para poder realizar un cálculo dinámico de las emisiones de carbono y detectar anomalías y patrones, además de la obtención de predicciones, es necesario contar con un modelo híbrido que incorpore varios modelos de aprendizaje automático de tipo ML. La suma de varios modelos podrá resolver todas las cuestiones. Este planteamiento es especialmente relevante dentro del ámbito de la construcción en su fase de obra, donde los

datos son heterogéneos, proceden de distintas fuentes y con diferente nivel de trazabilidad. Ello es coherente con las tendencias señaladas en un estudio realizado por Al Nuami que empleaba diferentes algoritmos aplicados a la estimación del carbono (Al Nuaimi et al., 2025). Otra publicación que apoya este enfoque es la realizada para predecir emisiones de carbono durante la construcción de varias estaciones de metro en China (Mei et al., 2025). Se emplearon datos de múltiples fuentes para obtener los mejores resultados.

Idealmente, la arquitectura del sistema para el cálculo dinámico y obtención de anomalías, desviaciones y predicciones en las emisiones de carbono durante la fase de obra. Deberá integrar la metodología BIM, como repositorio georreferenciado de los datos. Así, Widjaja & Kim (2025) definieron un marco metodológico basado en IA y BIM con el objetivo de optimizar el consumo de acero en la construcción de muros pantalla de una infraestructura de transporte urbano de Singapur.

Los anteriores trabajos comentados, refuerzan la idea de que la IA aplicada al cálculo y seguimiento de la huella de carbono en la construcción, no solo se pueden emplear en obtener predicciones. Deben considerarse como arquitecturas completas para detectar anomalías, identificar patrones, predecir resultados y simular diferentes escenarios de mejora. Esta lógica las hace especialmente ideales para su empleo en la fase de obra. Puesto que esta fase, presenta una gran variabilidad de datos, incompletos en ocasiones y con unas condiciones técnicas y operacionales cambiantes.

2.4.4.3. Modelos interpretables para datos tabulares de obra: Isolation Forest, K-Means y Random Forest

Una vez realizado el cálculo estático de la huella de carbono en un proyecto de estación de metro, comienza la fase de obra. En apartados anteriores, se ha determinado que la metodología más apropiada es completar y rectificar los valores estáticos de huella de carbono con un nuevo cálculo que incorpore los valores reales.

Estos datos son numerosos y dependen del tipo de unidad primaria ejecutada. Hay datos comunes, pero otros son singulares de cada una de las unidades primarias de ejecución. No son los mismos datos, los recogidos para la ejecución de unos pilotes que lo recogidos para documentar una excavación de pantallas. Todos deben estructurarse a través de tablas.

A priori para tratar estos datos tabulados con IA hay dos opciones. La primera opción es adoptar modelos más clásicos de aprendizaje automático (ML), siguen siendo especialmente útiles, al ofrecer un equilibrio entre precisión, robustez e interpretabilidad. Dentro de esta familia se sitúan modelos como Random Forest o Isolation Forest. El segundo camino es centrarse en modelos con arquitecturas profundas, como los modelos Deep Learning, un ejemplo serían los modelos de Redes Neuronales profundas. Este último tipo presentan dos grandes problemas, por un lado, la necesidad de contar con un gran volumen de datos. En ocasiones no se puede satisfacer esta condición con los datos obtenidos de una obra. Por otra parte, y no menos importante es que presentan una menor transparencia interna, una mayor necesidad de computación y son de menor facilidad de auditoría frente a modelos clásicos (Akinosho et al., 2020 ; Al Nuaimi et al., 2025).

El motivo por el que se indica que los modelos de aprendizaje profundo tienen menor auditabilidad, es porque resulta muy complicado explicar, revisar y justificar los resultados obtenidos. No debe pasarse por alto, que estos

modelos manejan millones de parámetros durante su entrenamiento. Lo que complica la identificación de que variables son las que han influido en un resultado. Aunque pueden ofrecer buenas predicciones. Este hecho es una limitación relevante en la predicción de estimaciones de huella de carbono en una obra. No basta con obtener la predicción, sino que también es necesario poder conocer la razón que la produce.

En el capítulo anterior (2.4.4.2) se especificaba que, dentro del análisis de las emisiones de carbono en construcción, dependiendo de la función a resolver, había modelos clásicos de IA que eran idóneos.

Función de detección de anomalías:

El modelo más adecuado es **Isolation Forest**. Fue propuesto por Liu, presenta una gran eficiencia computacional (F. T. Liu et al., 2008). Permite detectar registros anómalos dentro de datos de obra sin necesidad de etiquetarlos previamente. Por ejemplo, en la ejecución de micropilotes, el modelo podría identificar aquellos elementos que, aun teniendo una profundidad y diámetro similares al resto, presentan consumos de combustible, o tiempos de ejecución muy superiores al resto. Es de tipo no supervisado, no requiere que se le indique previamente cual es la respuesta correcta. Solo necesita los datos. Este modelo no determina por sí solo la causa de la desviación simplemente señala que unidades se desvían del conjunto de datos. Por ello, encaja perfectamente con los datos provenientes de una obra, ya que está capacitado para manejar conjuntos de datos heterogéneos, encontrando entre ellos los elementos anómalos. No debe olvidarse que no explica por sí solo la causa de las/las anomalías detectadas.

Función de identificación de patrones:

El **algoritmo K-Means** representa una referencia clásica (Macqueen, 1967). Es de tipo no supervisado igual que el anterior. Se caracteriza por su sencillez y por presentar buenos rendimientos. Su objetivo es agrupar observaciones con características similares en un número previamente definido de clústeres o grupos de datos que se parecen entre sí. El modelo asigna un centroide por cada clúster. El centroide representa el valor medio del grupo. Durante varias iteraciones el modelo va asignando a cada dato su cercanía o lejanía a los diferentes clústeres, hasta conseguir estabilizar los diferentes grupos. Así detecta patrones que a simple vista no pueden ser identificados al revisar una tabla. Por ejemplo, se han ejecutado 300 micropilotes en los que cada uno tiene una longitud y un consumo de gasoil de la máquina. K-Means cogería todos los micropilotes y los agruparía según su comportamiento. Unos micropilotes tienen poca longitud y poco consumo, los mete en un grupo. Otros tienen mucha longitud y mucho consumo, los mete en otro. Pero si aparecen micropilotes cortos con mucho consumo de gasoil, los puede separar en un grupo distinto, porque su comportamiento no encaja con los anteriores. Cuando hay muchas variables de cada unidad de obra k-Means identifica con solvencia los patrones.

Función de predicción supervisada:

La mejor opción es emplear el **algoritmo Random Forest** (Breiman, 2001). Es un método de aprendizaje automático supervisado porque necesita ejemplos anteriores donde ya se conoce el resultado real. Hace predicciones a partir de datos conocidos. Utiliza muchos árboles de decisión para realizar las predicciones. Cada árbol se entrena con una muestra diferente de los datos y analiza distintas combinaciones de variables. El resultado final se obtiene calculando la media de las predicciones realizadas por todos los árboles. Un

árbol de decisión puede definirse como una cadena de preguntas sencillas. Por ejemplo, para estimar la huella de carbono de un micropilote, un árbol podría preguntarse: ¿la longitud es mayor de 20 m?, ¿el consumo de gasoil supera los 50 litros?, ¿las horas de máquina son altas? En función de las respuestas, el árbol llega a una predicción final. El modelo no utiliza un solo árbol, sino muchos diferentes. Cada uno de los árboles se entrena con una parte distinta de los datos y se analizan múltiples combinaciones de variables. Al final, de cada árbol se obtiene una predicción. Para el caso de los micropilotes, cada árbol predice un valor de huella de carbono para el micropilote, la media de todas las predicciones será el resultado entregado. El modelo aplicado en una obra primero aprende de unidades ya ejecutadas y a partir de ellas es capaz de predecir en función de las distintas variables.

El modelo permite trabajar con múltiples variables numéricas, además, permite estimar la importancia relativa de cada variable en la predicción identificando qué factores han contribuido más al resultado del modelo. Esto es muy importante en las predicciones de emisiones de carbono en obra. En este contexto, no solo se requiere conocer el resultado, también es necesario saber la importancia de cada variable o que factores tienen un mayor peso en el resultado final.

Para complementar y reforzar la interpretación de los modelos basados en árboles de decisión se pueden utilizar técnicas como **SHAP** (SHapley Additive exPlanations) (Lundberg & Lee, 2017). Su fundamento se basa en la teoría de juegos cooperativos. En ellos se analiza cuanto aporta cada jugador al resultado final. En un modelo de IA, cada variable se interpreta como si fuera un ‘’jugador’’ que contribuye de una manera u otra en cada predicción. El empleo de SHAP permite descomponer una predicción en la aportación

individual de cada variable. Por ejemplo, si hay una predicción que indica que un micropilote tiene un valor alto de huella de carbono, SHAP indica a que se debe ese valor, si a un consumo alto de combustible o a un bajo rendimiento de maquinaria, así se complementa la predicción recibida del modelo Random Forest y la acompaña de una explicación técnica detallada. En resumen, SHAP reparte la predicción entre las variables que han intervenido, mostrando la contribución de cada una en el resultado final.

El conjunto de los tres algoritmos, Isolation Forest, K-Means y Random Forest, configuran un sistema capaz de cubrir tres funciones complementarias dentro del estudio y análisis de conjuntos de datos. Los resultados obtenidos de su aplicación pueden interpretarse mucho mejor que otros enfoques más complejos que emplean modelos de Deep Learning. Otra de las ventajas que tiene estos modelos, es que se adaptan mejor a entornos donde los datos son heterogéneos y limitados, como el entorno de una obra.

Por el contrario, los modelos de deep learning, necesitan para su entrenamiento millones de datos, de no disponer de estos volúmenes, no son capaces de extrapolar correctamente las predicciones.

2.4.4.4. Explicabilidad, validación e incertidumbre

En el cálculo del ACV clásico en una obra inicialmente se toman los valores de emisión de CO_2 procedentes de bases de datos y se asignan a partidas (por ejemplo: ml de micropilote) o incluso a un nivel inferior a elementos simples que forman las partidas (por ejemplo: h de maquinaria de micropilote). También se emplean fichas técnicas de materiales y declaraciones ambientales de producto en las cuales los fabricantes declaran los valores de huella de carbono que le corresponden a cada material empleado. Al

incorporar modelos de IA para la predicción de estimaciones se aumenta en varios grados la dificultad de conseguir una explicabilidad. Sin embargo, como se ha visto en el anterior apartado, los valores de SHAP hacen posible su explicación ya que se puede justificar cada predicción obtenida del modelo.

También es necesario realizar una validación del modelo, es decir obtener garantías sobre los valores obtenidos. En el empleo del algoritmo Random Forest hay presentes dos niveles de incertidumbre.

El primer nivel es la incertidumbre asociada al propio sistema del ACV. Hay unos factores de emisión, unos consumos, unos partes de producción o unas imputaciones de recursos en la ejecución de cada elemento. Para gestionar este primer nivel de incertidumbre se debe emplear un marco de Niveles de Certeza —LoC—, que clasifica cada entrada del inventario según su origen y fiabilidad. Es decir, informa sobre la calidad documental de los datos empleados. Responde a la pregunta ¿Este dato es fiable?, es como un semáforo de confianza de un dato. Para incorporarlo a las tablas de datos, se introduce una columna con la fiabilidad del dato. Una publicación interesante relacionada es la realizada por Edelen & Ingwersen (2016) sobre la calidad de los datos en los Inventarios del Ciclo de Vida.

El segundo nivel de incertidumbre está asociado al tipo de entrenamiento que se ha realizado con el modelo y los datos empleados. Es necesario conocer el grado de confianza que pueden atribuirse a las estimaciones obtenidas del modelo Random Forest. En otras palabras, su fiabilidad estadística (Hastie et al., 2009). Para ello, es adecuado emplear la validación cruzada K-Fold. Consiste en el entrenamiento del modelo con un subconjunto de los datos y emplear otro subconjunto como datos de evaluación. El proceso se aplica durante varias iteraciones en las que cada vez un subconjunto diferente es el

empleado para la evaluación, esto se realiza hasta completar el entramiento con todos los subconjuntos del conjunto de datos. Obteniéndose las siguientes métricas:

- Coeficiente de determinación R2: mide que proporción de variabilidad de la huella de carbono entre elementos (por ejemplo, paneles de hormigón) es reproducida por el modelo.
- Error absoluto medio MAE: expresa el error medio de predicción en kg CO_2 por elemento.
- Raíz del error cuadrático medio RMSE: es útil para identificar si el modelo falla especialmente con determinados elementos respecto a los valores predichos.

Los resultados obtenidos con Random Forest nunca deben entregarse como valores únicos, lo adecuado es acompañar cada valor con una medida explícita de error, permitiendo de esta forma poder realizar una diferenciación entre predicciones robustas y estimaciones que requieren tomar cierto nivel de cautela.

El empleo de la IA debe utilizarse como una herramienta que complementa el análisis de los técnicos. A pesar de que gracias a los valores de SHAP se pueden conocer las variables que tienen una mayor influencia en el resultado de la predicción, estos valores por si solos no son capaces de establecer las relaciones causa-efecto del proceso constructivo.

Una arquitectura que combina diferentes modelos de aprendizaje automático, datos reales de obra y unos técnicos competentes conseguirá no solo predecir con certeza las emisiones de una obra sino tomar las mejores

decisiones durante su trascurso para reducir las emisiones de huella de carbono.

2.5. Síntesis crítica: brechas de conocimiento y respuesta metodológica

Tras la revisión realizada en los apartados anteriores, se puede concluir que la cuantificación de la huella de carbono en la construcción de infraestructuras subterráneas se encuentra en una fase de transición metodológica. Por una parte, el marco normativo exige una trazabilidad documental en el desarrollo de los módulos A1-A5 siendo necesario diferenciar el carbono previsto frente al carbono real. Además, el o los modelos utilizados deben ser auditables. Hasta la fecha, el cálculo clásico del ACV empleaba mediciones de proyecto y factores de emisión teóricos, despreciándose las variaciones que las operaciones de ejecución y las cantidades realmente realizadas introducen en el resultado final. Para calcular la huella de carbono real que se obtiene en una obra, se debe tener en cuenta el mayor número posible de variables que influyen en el cálculo del ACV, como podrían ser los consumos de maquinaria, las rutas de transporte de los materiales, la energía empleada, los volúmenes reales de hormigón o de acero y tener en cuenta cualquier incidencia de obra que altera los rendimientos.

El cálculo estático inicial, con valores de emisiones de carbono teóricas, que tradicionalmente se hace antes de empezar una obra, debe mantenerse añadiendo un cálculo real dinámico que recoja todas las variables que se produzcan durante la fase de obra. La captura de los datos primarios de la obra unida a la incorporación de modelos de IA de tipo Machine Learning,

permitirá la obtención de anomalías, patrones y predicciones de resultados. Con ello los técnicos y directores de obra, tendrán una mayor facilidad y velocidad en la toma de decisiones que puedan contribuir a controlar y reducir las emisiones de carbono producidas durante la obra.

El ACV pasará de un valor global inicial y estático asociado a las diferentes unidades operativas (por ejemplo, un pilote o un m^2 de losa de hormigón) a una herramienta de análisis de cada elemento constructivo.

Fruto de la revisión realizada en el Estado del Arte se han identificado 4 brechas que justifican el desarrollo metodológico que se presenta en el capítulo 3.

2.5.1. Brecha 1: ausencia de datos primarios A5 en estudios de metro español

Los cálculos de ACV de infraestructuras ferroviarias y de metro disponibles para el contexto español se han basado mayoritariamente en mediciones de proyecto, inventarios de referencia y factores de emisión con origen en bases de datos. Sobre estas fuentes se aplican las cantidades teóricas de cada elemento de la infraestructura. Esto representa una primera aproximación de la que se obtiene un valor inicial de huella de carbono. Sin embargo, presenta una limitación importante: no incorpora los consumos reales de maquinaria, los registros diarios de producción, no valora sobrexcavaciones, no tiene en cuenta cambios en la ejecución de la obra (módulo A5). Trabajos como el de Kortazar et al. (2023), centrado en la Y Vasca de alta velocidad, corroboran como se calcula el valor del ACV en infraestructuras ferroviarias españolas evidenciando la necesidad de incorporar datos reales durante la construcción de la infraestructura.

La falta de incorporación de datos y condiciones reales de ejecución es especialmente relevante en obras subterráneas como la construcción de una estación de metro, donde las emisiones tienen una gran dependencia de la tipología estructural, los materiales empleados y el proceso constructivo. En esta línea, Soga et al. (2011) muestra que en la ejecución de distintos sistemas de contención, la emisión de energía depende de forma significativa de las diferentes tipologías adoptadas, recayendo un mayor peso en aquellas unidades con acero y hormigón. En otros procesos constructivos los trabajos de ejecución presentan una mayor estandarización, estando muy cercanos los cálculos iniciales de los valores reales. Sin embargo, en la construcción de una estación de metro, intervienen muchas variables difícilmente predecibles en la fase de proyecto. Por ejemplo: las condiciones geotécnicas reales, el rendimiento de la maquinaria, la estabilidad de la excavación, el consumo de bentonita, los tiempos de ciclo o los sobreconsumos de hormigón, son entre otros, difíciles de cuantificar. En consecuencia, toda metodología que incluya la incorporación de los datos primarios mejorará sustancialmente los resultados obtenidos.

Como **respuesta metodológica** se emplearán conjuntos de datos primarios recopilados durante todo el proceso de ejecución de las unidades de obra. Estos datos van a permitir calcular la huella de carbono a escala individual y asignar a cada entrada del inventario un Nivel de Certeza (LoC) según su origen documental.

2.5.2. Brecha 2: brecha *Ex ante*/*As-built* no cuantificada en la ejecución de una estación de metro

La bibliografía revisada denota que la fase de construcción aporta la mayor parte de emisiones del ciclo de vida de las infraestructuras ferroviarias. Así se

puede extraer del estudio español de la línea Madrid-Toledo (Damián & Zamorano, 2023). Ante esta evidencia no hay estudios que recojan el porcentaje de variabilidad entre los valores teóricos *Ex ante* de emisiones de carbono versus valores *As-built*, durante la ejecución de la obra en estaciones de metro en España (fase A5).

La especial singularidad de estas obras, a priori hace temer que presentará importantes desviaciones.

Como **respuesta metodológica** inicialmente se realiza un cálculo de la huella *Ex ante* y se compara el cálculo obtenido de huella *As-built* que es calculado a partir de los datos reales de obra. La disgregación en los cálculos, como unidades primarias, permitirá encontrar desviaciones, cuantificar su magnitud y explorar sus posibles causas mediante la combinación de ACV, datos primarios e inteligencia artificial.

2.5.3. Brecha 3: falta de metodología granular, trazable y explicable unidad a unidad

Los cálculos de huella de carbono en infraestructuras ferroviarias se suelen agrupar por capítulo o por tipología constructiva. La granularidad, en la cual la unidad de análisis es cada elemento que forma una partida de obra civil, presenta importantes ventajas. La valoración individual de cada elemento constructivo mejora la precisión del cálculo y su utilidad para la gestión, permitiendo identificar grupos homogéneos de comportamiento y singularidades. Esto permitirá en un futuro mitigar estas variables con el objeto de reducir la huella de carbono durante la fase de obra. Esta necesidad de granularidad es coherente con trabajos recientes en infraestructuras de transporte urbano como la realizada por Widjaja & Kim (2025), quienes

demostraron la necesidad de abordar a escala de componente constructivo y no solo mediante una solución al conjunto.

Por otra parte, la granularidad no exime de cumplir con la trazabilidad y explicabilidad. No es suficiente con calcular una huella por elemento constructivo, sino que es necesario justificar cómo se ha obtenido y qué variables han intervenido.

Como **respuesta metodológica** se combinan varios algoritmos que se integran en la metodología propuesta. Mediante el K-Means se agrupan elementos constructivos en clústeres homogéneos según valor de emisión de carbono. Se pueden diferenciar perfiles eficientes, estándar o intensivos. El Random Forest modeliza la relación entre las distintas variables que influyen en la huella de carbono. Los valores SHAP complementan el análisis al explicar, para cada elemento constructivo, qué variables contribuyen a aumentar o reducir la predicción del modelo. El marco LoC, clasifica cada dato según su nivel de certeza. La combinación de todas las herramientas nombradas presenta una metodología de ACV elemento a elemento constructivo en un sistema granular, trazable y explicable.

2.5.4. Brecha 4: ausencia de herramientas de gestión dinámica del carbono durante la ejecución

Tal como se ha señalado en apartados anteriores, el cálculo de ACV en la fase A5 de obra, habitualmente no pasa de un cálculo inicial apoyado en bases de datos de emisiones y completado con fichas de fabricantes. En alguna ocasión, una vez terminada la obra se actualiza el ACV a partir de las mediciones reales ejecutadas. Esta metodología tradicional limita la capacidad de apoyar decisiones durante la ejecución de la obra. Además,

contrasta con el enfoque de gestión activa promovido por PAS 2080:2023 (British Standards Institution, 2023). También es opuesto a líneas recientes que integran BIM, ACV y gemelos digitales para calcular un ACV dinámico (Zou et al., 2025). Si se realizara una gestión semanal, quincenal o mensual que incorporase los datos de obra, a partir de las desviaciones detectadas y la diferencia entre el comportamiento real y el previsto, se podrían tomar mejores decisiones durante la ejecución, siendo necesario la implementación de un sistema que permita realizar el cálculo dinámico monitorizando la huella de carbono elemento a elemento.

Como **respuesta metodológica** se propone la creación de una aplicación con carácter de prototipo, desarrollada exclusivamente para la obra, que calcule el ACV elemento por elemento con capacidad para realizar predicciones, detectar anomalías y patrones, siendo un complemento perfecto para la toma de decisiones durante la ejecución. La arquitectura de la aplicación constaría de una zona de recogida de datos y un modelo híbrido de aprendizaje automático de tipo ML. De este modo, se podría realizar una gestión dinámica de la huella de carbono a través de un software que facilite la gestión activa de emisiones durante la ejecución de la obra.

2.5.5. Tabla de correspondencias: brechas y respuestas metodológicas

Tabla 7. Tabla de correspondencia entre brechas y respuestas metodológicas. (Elaboración propia)

Brecha identificada	Respuesta metodológica	Principales instrumentos
B1. Ausencia de datos primarios A5 en estudios de metro español	Recopilación de albaranes, partes de trabajo, consumos reales en obra.	Cálculo de ACV *As-built*. Aplicación de niveles de certeza LoC.
B2. Brecha entre cálculo estático	Cálculo y comparación unidad a unidad entre la	Empleo del algoritmo Isolation Forest.

Brecha identificada	Respuesta metodológica	Principales instrumentos
inicial y cálculo con datos de obra en estaciones de metro	huella prevista al inicio y la huella calculada con datos reales de ejecución.	
B3. Falta de metodología aplicada elemento a elemento individual, perfectamente explicable	Cálculo de huella por elementos individuales, predicciones, detección de patrones y anomalías. Explicación individual de variables que influyen en resultados.	K-Means, Random Forest, SHAP, LoC.
B4. Ausencia de herramientas de gestión dinámica de la huella de carbono en obra	Integración de ACV, datos reales de ejecución con modelo de aprendizaje automático que prevé resultados y identifica anomalías. Cálculo dinámico de huella de carbono.	Prototipo de aplicación de seguimiento y predicción de ACV en obra, elemento a elemento.

Las cuatro brechas identificadas son dependientes y están relacionadas. La disponibilidad de poseer datos primarios reales de obra permite calcular un ACV *As-built* preciso. Con esta base, el empleo de algoritmos de aprendizaje automático identificara anomalías y patrones. Además de modelizar la relación entre la influencia de las variables de obra en el resultado de cálculo. Un sistema completo que avanza de un ACV estático a un ACV dinámico orientado a la gestión y toma de decisiones durante la ejecución de una obra de estación de metro. La metodología propuesta podría aplicarse en otro tipo de obras civiles.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Definición del sistema, alcance y límites del ACV

Una vez completada la revisión bibliográfica y definidas las brechas encontradas, se define el objetivo, alcance y unidades empleadas para expresar lo resultados, así como la metodología que permitirá desarrollar el camino para resolver las brechas detectadas.

3.1.1. Enfoque metodológico, objetivo y delimitación del estudio

Para la cuantificación, seguimiento y análisis de la huella de carbono asociada a la construcción de una estación de metro, dentro de las unidades de obra civil, este trabajo definirá una metodología híbrida combinando datos reales de obra con técnicas de análisis de inteligencia artificial. Como resultado se podrá obtener un análisis de la variabilidad de los procesos constructivos.

El planteamiento aplicado se basa en dividir los procesos constructivos de obra hasta el nivel de elementos constructivos individuales. Cada uno de ellos tiene sus características geométricas, cantidades de materiales, transportes, empleo de maquinaria, consumos energéticos y unas emisiones generadas. El cálculo que se realizará estará a una escala que permitirá disponer de la suficiente resolución para detectar diferencias entre elementos aparentemente similares.

La arquitectura definida se podrá aplicar a unidades repetitivas de obra civil como pilotes, paneles de pantalla o losas. El procedimiento será común para todos los casos:

1. Identificación de la unidad primaria.
2. Construcción del inventario trazable.
3. Cálculo de la huella de carbono prevista y real.

4. Introducción de técnicas de análisis de datos para la detección de anomalías.
5. Identificación de patrones.
6. Estimación de escenarios futuros.

El desarrollo de la metodología de este trabajo se limitará a la ejecución de paneles de pantallas de hormigón armado. En el momento de redactar este trabajo, es la unidad de la que se dispone de suficiente información de obra para aplicar la metodología.

Por tanto, la unidad elemental sobre la que se establecerá la metodología será el panel, debido a que están ejecutados, hecho que permite tener un inventario de información real suficiente de los mismos.

La limitación a la unidad de panel no constituye una restricción conceptual de la metodología aplicada. La metodología definida será exportable a otras unidades siempre que se disponga de datos reales.

Aunque el cálculo comprende el conjunto A1-A5, el principal elemento característico de este trabajo se encuentra en la incorporación de información real en la fase de construcción. Por ello, los módulos A1-A3, se calcularán a partir de las cantidades de materiales y los indicadores ambientales procedentes de las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) o bien como alternativa de bases de datos públicas. El módulo A4 se determinará a partir de las cantidades transportadas y los medios de transporte utilizados. El módulo A5 se apoyará en los partes diarios de trabajo y cualquier información primaria disponible.

La metodología diferencia al menos dos escenarios:

- ACV *Ex ante*: Es la huella de carbono prevista antes de la ejecución. Obtenida a partir de las mediciones de proyecto, rendimientos de los descompuestos de precios y distancias previstas, así como los factores de emisión disponibles. En el caso de existir un proyecto modificado podrían existir dos escenarios: *Ex ante* proyecto y *Ex ante* modificado.
- ACV *As-built*: Es la huella de carbono correspondiente a la ejecución realizada. Se calcula con las cantidades reales consumidas, distancias efectivas y los registros de maquinaria y producción.

El análisis de los resultados obtenidos se realizará para cada panel de forma individual. Esta escala permitirá relacionar la huella de carbono con variables como la superficie, la profundidad, el volumen teórico de hormigón frente al real, consumo de bentonita o las horas de funcionamiento de la hidrofresa.

El ACV constituye la base cuantitativa del sistema. Las técnicas de inteligencia artificial a aplicar se emplearán sobre el inventario y valores calculados para identificar patrones anómalos, agrupar paneles de características similares, modelizar relaciones entre variables para permitir estimar la huella de carbono en paneles futuros o actuaciones comparables.

El flujo metodológico general adoptado es el siguiente:

Datos de proyecto → Cálculo *Ex ante* → Recopilación de datos reales → Cálculo *As-built* → Comparación panel a panel → Análisis mediante IA → Interpretación técnica → Propuesta de medidas de reducción.

Tabla 8. Componente y aplicación en el trabajo. (Elaboración propia)

Componente	Aplicación en el trabajo
Metodología general	ACV granular aplicable a unidades repetitivas de obra civil

Componente	Aplicación en el trabajo
Aplicación empírica	Paneles de pantalla ejecutados mediante hidrofresa
Alcance modular	A1-A5
Escenario inicial	ACV *Ex ante* con datos de proyecto
Escenario real	ACV *As-built* con datos de ejecución
Nivel de análisis	Panel individual
Análisis complementario	Isolation Forest, K-Means, Random Forest y SHAP
Actualización	Incorporación periódica de datos de obra
Finalidad	Cuantificación, interpretación y apoyo a la reducción de emisiones

3.1.2. Definición del alcance

Dentro de la metodología propuesta hay dos niveles de alcance, relacionados pero diferentes.

El alcance conceptual, viene definido por la arquitectura que aporta el sistema definido en el trabajo. Es un modelo de cuantificación de huella de carbono aplicable a unidades constructivas de obra civil.

El alcance real y empírico está delimitado por los datos del caso de estudio, se limita a los paneles de pantalla ejecutados con hidrofresa. Cada panel contará con suficientes datos que permitan definirlo perfectamente a partir de los datos reales. Cada registro deberá evaluarse a través de un sistema de Nivel de Certeza (LOC) que se propondrá específicamente. En el caso de que

falte algún dato de panel no necesariamente deberá excluirse. Podrá incorporarse siempre que se justifique su inclusión.

Los principales materiales contemplados serán el hormigón, el acero de las armaduras y la bentonita. También se incorporarán los transportes, la excavación mediante hidrofresa, el empleo de maquinaria, y las operaciones necesarias para dejar el panel completado.

El sistema definido en la metodología se circunscribe a las pantallas ejecutadas en la estación objeto de estudio. Desde un punto de vista del alcance geográfico, en la fase A4 se considerarán los recorridos desde los centros de fabricación o suministro hasta el recinto de la obra. La fase A5 contemplará las pantallas que estén dentro del recinto de la obra de la estación de metro considerada.

A nivel temporal, el alcance estará limitado por el periodo de tiempo de ejecución de las pantallas de hormigón.

Finalmente, el alcance documental estará delimitado por:

- Planos
- Mediciones de proyecto
- Fichas y listados de paneles
- Partes diarios de la hidrofresa
- Registros de tiempos y producción
- Albaranes de suministros
- Documentación de transportes
- DAP de los productos suministrados o valores extraídos de bases de datos públicas

Se intentará vincular cada uno de los datos al documento del que se han extraído, para poder tener una trazabilidad.

3.1.2.1. Alcance del prototipo.

La aplicación informática se creará para inicialmente recoger los datos de las pantallas. Se desarrollará con una estructura modular que permita incorporar en un futuro otras unidades constructivas. No tendrá ningún objetivo comercial, se pretende demostrar su viabilidad para integrar todos los pasos de la metodología definida. Desde la introducción de valores, el cálculo del ACV y la comparación de resultados y análisis con técnicas de IA.

Tabla 9. Aspecto relacionado con alcance conceptual y empírico. (Elaboración propia)

Aspecto	Alcance conceptual	Alcance empírico
Ámbito	Unidades repetitivas de obra civil	Paneles ejecutados mediante hidrofresa
Unidad elemental	Elemento constructivo individual	Panel individual
Información	Datos de proyecto y datos reales	Documentación disponible de las pantallas
ACV	Comparación *Ex ante*/*As-built*	Cálculo A1-A5 por panel
Calidad del dato	Clasificación según origen y trazabilidad	Aplicación del LoC a cada registro
IA	Anomalías, agrupación y predicción	Modelos entrenados con datos de paneles
Aplicación	Arquitectura ampliable	Prototipo configurado para pantallas
Principal limitación	Requiere adaptación a cada tipología	No representa la huella completa de la estación

3.1.3. Unidad de análisis, unidad funcional y unidades de resultado

La unidad elemental de análisis es el panel individual de pantalla de hormigón ejecutada mediante hidrofresa. Cada uno de ellos será un registro único e independiente. Se definirá un código individual para cada uno de los paneles. De tal forma que resulte sencillo asociar al código toda la información recopilada. Como la geometría, consumos o las emisiones calculadas. El motivo de la elección es la organización que se define en obra, donde se planifica, organiza y ejecuta por paneles. El panel se empleará como unidad para recopilar los datos. Se obtendrá kg CO_2e /panel, para expresar la huella de cada panel.

Los paneles presentan dimensiones variables, por lo que el resultado absoluto en kg CO_2e /panel no es suficiente para comparar elementos. Por esta razón, se define una unidad funcional que represente la ejecución de 1 m^3 de pantalla de hormigón armado mediante hidrofresa. La unidad funcional facilita la comparación entre distintas zonas de pantallas de la obra. Se obtendrá kg CO_2e/m^3 de pantalla, pudiéndose comparar paneles de diferentes características. Además, se calcula la intensidad superficial en kg CO_2e/m^2 para comparar paneles con distinta longitud y profundidad manteniendo una referencia geométrica sencilla.

Unidades para presentar los datos:

- t CO_2e, para expresar la huella agregada del conjunto analizado.
- kg CO_2e desagregados por módulos A1-A3, A4 y A5.
- Desviación absoluta y relativa entre los escenarios *Ex ante* y *As-built*.

Hay que señalar que la evaluación se limitará a la categoría de impacto de cambio climático según la norma UNE-EN ISO 14067:2019. En ella, los gases de efecto invernadero se convierten a una unidad común denominada kilo de

CO_2 equivalente (kg CO_2e) mediante su potencial de calentamiento global a cien años (GWP100). Cuando directamente se empleen fuentes para obtener el valor de emisión, estas proporcionarán los valores en kg CO_2e. Este es el caso de los módulos A1-A3, cuyos valores se obtendrán directamente de la Declaración ambiental de producto (DAP).

En los módulos A4-A5 los cálculos se realizarán a partir de factores que ya estén expresados en kg CO_2e por unidad.

Tabla 10.Definición de los elementos metodológicos. (Elaboración propia)

Elemento metodológico	Definición adoptada
Unidad de análisis	Panel individual de pantalla
Unidad funcional	1 m^3 de pantalla ejecutada mediante hidrofresa
Referencia global	Conjunto de paneles incluidos en el caso de estudio
Unidad absoluta	kg CO_2e /panel
Unidad normalizada	kg CO_2e /m^3
Unidad agregada	t CO_2e
Categoría de impacto	Cambio climático
Indicador	GWP100
Alcance modular	A1-A5

El panel será la unidad utilizada para recopilar y analizar los datos, mientras que el metro cúbico será la referencia empleada para comparar los resultados.

3.1.4. Límites del sistema: módulos A1-A5

Para determinar los límites aplicados en este trabajo se recurre a la norma UNE-EN 15804+A2:2020. El estudio comprende los siguientes módulos:

- A1-A3: etapa de producto.

- A4: transporte de los materiales hasta la obra.
- A5: ejecución de los paneles.

El resultado entregará una huella de carbono parcial A1-A5, que no representa el ciclo completo de la estación, sino que se ocupa de las emisiones generadas desde la producción de los materiales hasta la finalización de los trabajos de ejecución de las pantallas. Esta delimitación ya se recogía en el capítulo de Estado del Arte, donde se relacionan A1-A3 con la producción de hormigón y acero, A4 con su transporte y A5 con las operaciones de excavación, ferrallado y hormigonado.

Módulos A1-A3: etapa de producto:

Los módulos A1-A3 incluyen la recogida y tratamiento de las materias primas, su transporte hasta las instalaciones productivas y la fabricación de los materiales empleados en las pantallas.

Los principales productos considerados serán:

- Hormigón estructural.
- Acero corrugado para la armadura de las pantallas.
- Bentonita.

Este parte, no presenta interés para este trabajo, por ello se incorporarán mediante DAP verificadas o, cuando estas no estén disponibles, mediante bases de datos específicas del sector. Esto implica que en el cálculo *Ex ante* y *As-built* solo podrán diferenciarse por las cantidades teóricas o reales empleadas.

Módulo A4: transporte hasta la obra:

El módulo A4 comprende el transporte de los productos terminados desde la planta de fabricación hasta la obra de la estación de metro.

El análisis tratará de identificar para cada suministro:

- Centro de origen.
- Distancia de ida y de retorno.
- Tipo de vehículo.
- Número de viajes.
- Cantidad transportada y el estado de carga de cada trayecto.
- Relación con el panel o grupo de paneles correspondiente.

Para el cálculo *Ex ante* se utilizarán las distancias y centros de suministro previstos. En el escenario *As-built* se emplearán los recorridos reales siempre que estén documentados mediante partes o albaranes.

Aquellos transportes internos que se realicen dentro del recinto de la obra sus emisiones se incluirán en A5. Para poder incorporarlos será requisito que estén documentados.

Módulo A5: ejecución de los paneles:

El módulo A5 comprende las operaciones realizadas dentro de la obra para construir los paneles. Es el módulo que presenta el mayor interés para este trabajo. Los datos recopilados son registros de las operaciones realizadas en obra para la ejecución de las pantallas.

Se considerarán, en función de la información disponible:

- Excavación mediante hidrofresa.
- Consumo de gasóleo y/o electricidad.
- Utilización de grúas y medios auxiliares.

- Colocación de las jaulas de armadura.
- Hormigonado mediante tubo tremie.
- Transportes internos y otras operaciones directamente vinculadas a los paneles.
- Retirada de tierras.

La incorporación definitiva de cada proceso señalado dependerá de la disponibilidad de datos, registros y trazabilidad. Lo ideal será emplear datos que se puedan asignar a cada panel de forma individualizada. En el caso de que los registros presenten información de un grupo de paneles ejecutados en una o varias jornadas se podrán emplear, debiendo justificar de forma razonada el reparto o distribución entre los paneles afectados.

La recogida de la información debido a las circunstancias de las obras no será en tiempo real. Existirá un retardo entre la ejecución, la entrega de albaranes, partes de trabajo y resto de documentos.

Tabla 11. Tratamiento de los módulos en el trabajo. (Elaboración propia)

Módulo	Contenido	Tratamiento en el trabajo
A1-A3	Obtención de materias primas y fabricación	DAP verificadas o bases de datos específicas
A4	Transporte desde el centro de suministro hasta la obra	Cálculo mediante cantidades, orígenes, distancias y vehículos
A5	Ejecución de los paneles	Datos primarios de obra y criterios de asignación

3.1.5. Exclusiones, criterios de corte y limitaciones del alcance

La definición del sistema se completa con la identificación de los procesos excluidos y de las principales limitaciones del estudio.

Procesos de fabricación

Los procesos de fabricación de los materiales se encuentran incluidos ambientalmente dentro de A1-A3, pero no serán caracterizados directamente. El trabajo se centrará en las fases A4 y A5. Al ser las que mayor interés despiertan desde un punto de vista de construcción de obra civil.

Etapas del ciclo de vida excluidas

Quedan fuera del alcance los módulos B (fase de uso, mantenimiento, reparación y sustitución, C (demolición, transporte y tratamiento de los residuos al final de la vida útil) y D (beneficios derivados del reciclaje y la reutilización o valorización de los materiales).

Unidades de obra excluidas

Como anteriormente se ha señalado, se centra en la ejecución de pantallas de hormigón armado ejecutadas con hidrofresa. Todas las demás unidades de obra civil de la estación de metro son excluidas. Ello es debido, al empleo de datos reales recopilados en la obra. Durante la redacción del trabajo no se han completado otras unidades.

La metodología será perfectamente aplicable a otras unidades siempre que se cumpla el registro suficiente de datos (transporte, consumos y cantidades entre otros).

Medios auxiliares y consumos generales

Se intentará incluir en los cálculos de huella de carbono, los equipos y consumos que presenten una relación directa con las pantallas y puedan asignarse a cada panel de manera rigurosa. Siendo descartados, en el caso de asignaciones dudosas que puedan enmascarar los resultados. Serán descartados y excluidos las emisiones originadas por la fabricación de la

maquinaria de obra, al tratarse de máquinas que se emplean en un gran número de obras y con una vida útil larga.

Criterios de corte

No se estable un valor determinado de un material o de un consumo para excluirlo de los cálculos. Serán excluidos aquellos datos que no tengan una trazabilidad y registro adecuado.

Limitaciones principales

- Los resultados no representan la huella completa de la estación, sino la huella parcial A1-A5 de las pantallas analizadas.
- Los módulos A1-A3 dependen de la representatividad de las DAP y/o bases de datos disponibles.
- Las distancias y condiciones reales de transporte pueden no estar documentadas para todos los suministros.
- Algunos registros de consumo (en fase A5) podrían encontrarse agregados, siendo necesario emplear unos criterios de asignación.
- La calidad y completitud de los registros puede variar entre paneles.
- Los resultados que se obtendrán corresponden a una determinada obra en la que ha habido unas condiciones geotécnicas concretas.

Para clasificar la calidad de los datos se empleará un Nivel de Certeza. Cualquier asignación estimada a partir de registros reales que no pueda disgregarse a una pantalla deberá justificarse su reparto.

Tabla 12. Limitaciones. (Elaboración propia)

Proceso o elemento	Tratamiento	Justificación
Uso y mantenimiento	Excluido	Fuera del alcance A1-A5

Proceso o elemento	Tratamiento	Justificación
Fin de vida	Excluido	No responde al objetivo del estudio
Beneficios de reciclaje	Excluido	Módulo D no considerado
Procesos internos de fabricación	Incluidos de forma agregada	Representados mediante DAP o bases de datos
Otras unidades de la estación	Excluidas	Falta de datos reales completos
Fabricación de maquinaria	Excluida	Utilización en múltiples obras
Consumos generales no asignables	Excluidos	No pueden vincularse de forma fiable a los paneles
Equipos auxiliares	Incluidos cuando sean trazables	Depende de la calidad de los registros

3.2. Inventario de datos y niveles de certeza

La definición del inventario es importante para recopilar, ordenar y clasificar todos los datos recopilados durante la ejecución de la obra. A partir de estos se desarrollarán los diferentes cálculos y análisis.

El inventario se estructura a escala de panel individual. Deberá emplearse para poder relacionar las cantidades con su correspondiente panel, registrar el documento de donde se obtienen y una valoración de la calidad del dato. Esta estructura definida permitirá mantener la trazabilidad de todos los cálculos y análisis.

Los datos se agrupan en cuatro bloques:

- Características geométricas y técnicas de los paneles.
- Cantidades de materiales.
- Transporte desde los centros de suministro hasta la obra.

- Consumos y operaciones durante la ejecución.

3.2.1. Estructura del inventario

La información se organiza mediante un identificador único para cada panel. Este código permite relacionar los datos procedentes de planos, mediciones, albaranes y partes diarios.

Se compone de una tabla principal de paneles y de varias tablas auxiliares.

- **Tabla de paneles**: recoge la identificación, geometría y características técnicas de cada elemento.
- **Tabla de materiales**: registra los suministros y cantidades previstas o realmente empleadas.
- **Tabla de transportes**: contiene la procedencia, distancia, cantidad transportada y medio utilizado.
- **Tabla de ejecución:** incorpora los tiempos, consumos y operaciones desarrolladas en obra.

Una vez completadas las tablas auxiliares, la información se traslada de forma automática a la tabla principal donde para cada panel se recoge toda la información, revisada y libre de errores. Esta última será la empleada en los cálculos ambientales y en el análisis mediante inteligencia artificial. Se utilizarán todos los documentos disponibles para completar los datos (planos de proyecto, mediciones, albaranes y partes de trabajo).

Se deberá distinguir entre dos tipos de información:

- **Datos *Ex ante***: Proceden del proyecto, de las mediciones, de la planificación inicial y de los rendimientos previstos. Representan estimaciones.

- **Datos *As-built***: Proceden de la documentación generada durante la construcción. Incluyen las cantidades realmente suministradas, los transportes realizados y los consumos registrados en las operaciones de ejecución.

Tabla 13. Estructura general del inventario. (Elaboración propia)

Grupo de datos	Variables principales	Fuente prevista	Escenario
Identificación y geometría	Código, sector, tipología, longitud, profundidad y espesor	Planos y fichas de paneles	*Ex ante As-built*
Materiales	Hormigón, acero, bentonita y auxiliares	Mediciones, despieces y albaranes	*Ex ante As-built*
Transporte A4	Origen, distancia, cantidad, vehículo y viajes	Proveedores y documentación de suministro	*Ex ante As-built*
Ejecución A5	Horas, consumos, producción e incidencias	Partes diarios y registros de equipos	*As-built*
Contexto constructivo	Fecha, secuencia e incidencias	Partes y documentación de obra	*As-built*

3.2.2. Datos geométricos

Los datos geométricos forman la base para caracterizar cada panel y definir las estimaciones previstas antes de su ejecución. Se recopilarán los siguientes datos:

- Código identificativo.
- Estación, recinto o sector.
- Tipología o posición en la secuencia de ejecución.
- Secuencia prevista de ejecución.
- Longitud.

- Profundidad.
- Espesor.
- Superficie y volumen teóricos.
- Volumen previsto de hormigón.
- Cantidad prevista de acero.
- Características principales de los materiales.

Las variables de contexto, como la condición de panel primario/secundario o la zona geotécnica se registrarán siempre que la información este suficientemente documentada.

3.2.3. Datos de materiales: hormigón, acero y bentonita

El inventario de materiales recoge las cantidades previstas y reales de los principales productos empleados en la construcción de los paneles. Se consideran el hormigón, el acero de armadura y la bentonita.

Ante los dos escenarios existentes, *Ex ante* y *As-built*, se emplearán las cantidades procedentes de proyecto y las documentadas de consumos reales respectivamente.

Hormigón:

De la lectura de los albaranes de hormigón se puede obtener:

- Fecha del suministro.
- Planta de origen.
- Tipo y características del hormigón.
- Volumen suministrado.
- Panel al que se destina el suministro.

Cuando un albarán pueda vincularse directamente con un panel, el volumen se asignará íntegramente. Si un suministro se reparte entre varios paneles, deberá documentarse el criterio empleado para su distribución.

Acero:

La cantidad de acero se obtendrá a partir de las cantidades de proyecto para el escenario *Ex ante* y de las planillas aprobadas y suministradas para el escenario *As-built*.

Cuando la jaula de armadura esté identificada para un panel concreto, su peso podrá asignarse directamente. Si el suministro corresponde a un lote destinado a varios paneles, la distribución se realizará mediante el peso obtenido de los despieces o mediante otro criterio razonable que deberá ser registrado.

Bentonita:

La bentonita se registra mediante albaranes de suministro o consumos de la planta de lodos. Normalmente, no se diferencia por panel, de forma individual. En consecuencia, a partir de la información recopilada en obra, será necesario fijar un criterio de reparto para cada panel. Este criterio podrá ser por volumen de panel u otro criterio debidamente justificado.

3.2.4. Datos de transporte

El inventario del módulo A4 recoge los datos de transporte de los materiales desde la planta de producción o de distribución hasta la obra.

Para cada suministro se recopilarán:

- Material transportado.

- Centro de origen.
- Cantidad suministrada.
- Distancia hasta la obra.
- Tipo de vehículo.
- Capacidad o carga transportada.
- Número de viajes.
- Documento de procedencia.

En el caso de tener que calcular alguno de los datos por no disponer de la información correctamente segregada, se debe registrar el razonamiento aplicado.

La prioridad es asociar los datos por panel individual, si bien en muchos casos dependiendo del material será obligado realizar un reparto.

Cualquier movimiento interno realizado dentro del recinto de la obra se considerará en el módulo A5.

3.2.5. Datos de ejecución

La fuente principal son los partes diarios de la hidrofresa, en los que podrán identificarse variables como:

- Panel o paneles ejecutados.
- Fecha.
- Tiempo de perforación.
- Tiempo de colocación de armaduras.
- Tiempo de hormigonado.
- Profundidad o avance alcanzado.
- Volumen excavado.

- Paradas e incidencias.
- Observaciones sobre el terreno o el proceso.

Esta parte del inventario ofrece la información más relevante para analizar la variabilidad de emisiones de carbono en la ejecución de las pantallas.

Cuando se tenga un registro adecuado se incorporarán los siguientes datos:

- Consumo eléctrico de la planta de lodos.
- Horas de funcionamiento de grúas.
- Equipos auxiliares.
- Consumo de combustible, cuando esté registrado.
- Gestión de sobrantes directamente vinculados al panel.

Su inclusión dependerá de su disponibilidad y trazabilidad. En el caso de no disponer de un registro específico para un panel, no se resolverá asignando a ese panel un valor de consumo nulo.

3.2.6. Preparación y validación de los datos

Antes de realizar los cálculos, los datos recopilados deberán ser revisados y homogeneizados. Esta fase incluirá:

- Unificación de códigos de panel.
- Normalización de formatos y unidades.
- Comprobación de fechas.
- Eliminación de registros duplicados.
- Detección de campos vacíos.
- Contraste entre cantidades de proyecto y documentos de suministro.
- Identificación de valores incompatibles o aparentemente anómalos.

En el caso de encontrar valores anómalos de algún parámetro se comprobará con el cruce de toda la información a disposición si es correcto su registro. Habrá casos en los que la información de consumos de materiales esté agrupada en la documentación de obra para un grupo de paneles. Estos datos se repartirán individualmente siguiendo una regla. Siempre se mantendrán guardados los datos brutos de partida.

3.2.7. Clasificación de la calidad del dato mediante Niveles de Certeza — LoC—

La UNE-EN ISO 14044 establece que la calidad de los datos debe valorarse atendiendo, entre otros aspectos, a su representatividad temporal, geográfica y tecnológica, su integridad y su consistencia.

Para cumplir con estos requisitos, dentro del inventario se clasificarán los datos con Niveles de Certeza (LoC). Esta clasificación obedecerá a una propuesta metodológica propia de este trabajo, no está recogida en ninguna norma.

El Nivel de Certeza se asignará a cada dato o conjunto de datos según su procedencia y grado de trazabilidad:

Tabla 14. Definición de los niveles de certeza y ejemplos. (Elaboración propia)

Nivel	Definición	Ejemplos
LoC-A	Dato primario, específico y directamente documentado	Albarán asignado al panel, parte de hidrofresa, consumo medido
LoC-B	Dato documentado pero obtenido de forma indirecta, secundaria o mediante asignación	DAP del suministrador, distancia calculada, consumo repartido por horas

Nivel	Definición	Ejemplos
LoC-C	Dato genérico, estimado o imputado por ausencia de información directa	Rendimiento de referencia, base de datos genérica o estimación mediante modelo

Es importante señalar que la clasificación se realizará por dato y no por panel, posibilitando que un panel contenga datos con diferente nivel de certeza. Es imprescindible realizar la clasificación de los datos al introducirlos en las tablas auxiliares, de este modo las emisiones podrán analizarse e interpretarse con un mayor rigor y trazabilidad.

3.2.8. Tratamiento de datos ausentes

En los módulos A4 y A5, habrá algún caso en el que no se disponga de datos. Las causas pueden ser debidas a pérdida de información en la obra o incluso el no registro de algún dato por omisión. En estos casos, nunca se asignará un valor cero, se realizará una estimación o un cálculo que siga una regla coherente. Todo ello quedará registrado convenientemente. Los datos nulos podrían enturbiar los cálculos y análisis de los paneles implicados.

3.3. Herramientas, fuentes y factores de emisión

Definido el inventario, el siguiente paso consistirá en transformar las cantidades de materiales, transportes y consumos energéticos en emisiones de gases de efecto invernadero. Para realizar esta transformación se emplean los **factores de emisión**. Estos factores expresan la huella de carbono que se asocia a una unidad determinada de actividad.

Por ejemplo, gracias al factor de emisión se puede conocer la huella de carbono (expresada en kilogramos de CO2 equivalente) que genera un metro

cúbico de hormigón, un litro de gasoil o una tonelada de tierra transportada durante un kilómetro.

En el siguiente apartado (3.4) se exponen y explican las fórmulas y procedimientos matemáticos empleados. Para seleccionar los factores de emisión deben definirse las herramientas empleadas y las fuentes consultadas previamente.

3.3.1. Herramientas de gestión y tratamiento de la información

El inventario de datos para las pantallas recopila mucha información. Para ordenarla se emplea un libro de EXCEL con varias pestañas, cada pestaña cuenta con una tabla. De este modo, se almacenan de forma separada los datos de geometría, de transporte y operaciones de ejecución. Cada pantalla tiene un identificador único, gracias al cual se pueden relacionar todos los registros de cada pestaña con la pantalla adecuada.

Gracias a la hoja de cálculo se conservan los datos originales. Además, cada hoja de cálculo a través de fórmulas, entrega las emisiones correspondientes a los módulos A1-A5, tanto *Ex ante* como *As-built*. Los resultados se expresan en kg CO_2e por panel y en kg CO_2e /m². Las tablas incluyen los factores de emisión, definidos en este apartado, para poder calcular los resultados.

Todos los resultados se agrupan en una tabla final resumen, con una fila por panel que constituye la tabla consolidada. Posteriormente se procesa con Python, empleando bibliotecas de tratamiento de datos, aprendizaje automático y visualización. Sobre el conjunto de datos se aplican los algoritmos Isolation Forest, K-Means y Random Forest junto a técnicas SHAP de explicabilidad. Esta parte integra la aplicación de inteligencia artificial que se detalla en el capítulo 3.6.

3.3.2. Criterios para seleccionar los factores de emisión

Las normas UNE-EN ISO 14044 y UNE-EN ISO 14067 requieren que los datos sean adecuados para el objetivo del estudio y que se valore su representatividad, consistencia y trazabilidad. En consecuencia, pueden emplearse datos con origen en diversas fuentes: como DAP, bases de datos ambientales, inventarios internacionales o incluso estimaciones siempre que se documenten.

La selección de los factores de emisión es importante puesto que estos multiplican directamente las cantidades de materiales, transporte y consumos energéticos del inventario. Un factor de emisión mal elegido podría condicionar de forma significativa el resultado. En el apartado 3.4 de este trabajo, se muestran las fórmulas empleadas en los cálculos y la relevancia en ellas de los factores de emisión.

Se establece el siguiente orden general de preferencia:

Tabla 15. Preferencia de fuentes y aplicación. (Elaboración propia)

Prioridad	Fuente	Aplicación
1	DAP verificada del producto y fabricante real	Hormigón, acero y otros productos suministrados
2	DAP sectorial o de un producto técnicamente equivalente	Cuando no exista DAP específica
3	Base de datos ambiental reconocida	Materiales sin DAP o procesos auxiliares
4	Factor oficial nacional o sectorial	Combustibles, electricidad y transporte
5	Literatura técnica o valor proxy	Solo cuando no exista una fuente más representativa

3.3.3. Factores correspondientes a los módulos A1-A3

Algunos proyectos cuentan con valores medios de emisiones para los principales materiales del proyecto en su anejo de residuos o ambiental. En el caso de disponer de ellos se incorporarán en el escenario *Ex ante*. En el caso de que el proyecto no recoja ningún valor, se consultan bases de datos públicas.

Para el escenario *As-built*, las emisiones de fabricación del hormigón, acero y bentonita se deben incorporar mediante los valores de potencial de calentamiento global declarados en las DAP de los fabricantes. En el caso de no disponer de esta documentación o fichas técnicas, se buscan bases de datos públicas españolas.

Es necesario homogeneizar previamente las unidades de manera que la cantidad y el factor sean compatibles.

3.3.4. Factores correspondientes al transporte A4

El módulo A4 incluye el traslado de los productos desde el centro de suministro hasta la obra. Los factores de emisión podrían estar expresados en distintas unidades según la fuente utilizada:

- kg CO_2e por tonelada-kilómetro.
- kg CO_2e por vehículo-kilómetro.
- kg CO_2e por viaje.
- kg CO_2e por litro de combustible consumido.

Se empleará una única modalidad de cálculo para cada tipo de transporte, evitando combinar factores incompatibles.

En el escenario *Ex ante* se utilizarán las plantas previstas y sus correspondientes distancias obtenidas de la cartografía. Deberá tomarse como referencia una tipología de vehículo representativa.

Para el *As-built*, se tendrán datos reales de distancias, así como el combustible consumido en el transporte. Deberá tenerse en cuenta el viaje de vuelta del vehículo a la planta de distribución o fabricación.

3.3.5. Factores correspondientes a la ejecución A5

El módulo A5 se calculará principalmente a partir de los consumos de gasóleo y electricidad registrados durante la ejecución.

Para el gasóleo se seleccionará un factor expresado en kg CO_2e por litro.

Para la electricidad se empleará un factor expresado en kg CO_2e/kWh y representativo del sistema eléctrico español durante el periodo de ejecución.

Siempre tendrá prioridad el consumo real registrado:

- Litros repostados o medidos.
- Lecturas de contador.
- Telemetría.
- Registros energéticos de los equipos.

Cuando únicamente se disponga de horas de funcionamiento, el consumo podrá estimarse mediante un rendimiento horario documentado. En ese caso, el resultado tendrá menor Nivel de Certeza que una medición directa.

3.3.6. Registro y control de los factores seleccionados

Todos los factores utilizados se conservarán en una tabla maestra independiente del inventario de cantidades, que estará incluida en la propia

hoja de cálculo, de esta forma, un cambio de factor no modifica el dato de actividad original y puede conocerse qué versión se empleó en cada cálculo.

Con los criterios señalados en los apartados anteriores se han seleccionado los factores de emisión, recogiendo y sintetizando en la siguiente tabla la relación entre los módulos estudiados, los datos de actividad y las fuentes previstas.

Tabla 16. Relación entre los módulos estudiados, los datos de actividad y las fuentes previstas. (Elaboración propia)

Módulo	Material o actividad	Factor seleccionado	Unidad	Fuente y versión	Escenario	Justificación de la elección	LoC
A1-A3	Hormigón estructural	Pendiente de incorporar	kg CO_2e/m^3	DAP del hormigón suministrado	As-built	Corresponde al producto, fabricante y planta reales	A/B
A1-A3	Hormigón estructural	Pendiente de incorporar	kg CO_2e/m^3	DAP prevista o valor sectorial	Ex ante	Representa el producto previsto antes de conocer el suministro real	B
A1-A3	Acero B500SD	Pendiente de incorporar	kg CO_2e/kg	DAP del fabricante real	As-built	Representatividad tecnológica y geográfica del acero suministrado	A/B
A1-A3	Acero B500SD	Pendiente de incorporar	kg CO_2e/kg	DAP sectorial o base ambiental	Ex ante	Valor representativo cuando el fabricante no está definido	B
A1-A3	Bentonita	Pendiente de incorporar	kg CO_2e/kg	DAP o base de datos reconocida	Ambos	No se dispone inicialmente de una DAP específica del suministro	B/C
A4	Transporte de hormigón	Pendiente de incorporar	kg $CO_2e/t{\cdot}km$	Fuente oficial o base ambiental	Ambos	Compatible con la masa transportada, distancia y tipo de vehículo	B
A4	Transporte de acero	Pendiente de incorporar	kg $CO_2e/t{\cdot}km$	Fuente oficial o base ambiental	Ambos	Permite utilizar el origen y la distancia real del suministro	B
A4	Transporte de bentonita	Pendiente de incorporar	kg $CO_2e/t{\cdot}km$	Fuente oficial o base ambiental	Ambos	Adecuado para transporte pesado por carretera	B
A5	Gasóleo de hidrofresa	Pendiente de incorporar	kg CO_2e/L	Fuente oficial seleccionada	As-built	Compatible con los litros registrados en partes o repostajes	A/B
A5	Gasóleo de grúas y equipos auxiliares	Pendiente de incorporar	kg CO_2e/L	Misma fuente que el gasóleo de hidrofresa	As-built	Mantiene la consistencia entre equipos que utilizan el mismo combustible	A/B
A5	Electricidad de planta de lodos	Pendiente de incorporar	kg CO_2e/kWh	Factor del sistema eléctrico español	As-built	Representatividad geográfica y temporal del consumo eléctrico	A/B
A5	Equipos sin consumo medido	Pendiente de incorporar	L/h o kWh/h	Ficha técnica o rendimiento documentado	Ex ante o estimado	Permite obtener el consumo cuando solo se conocen las horas de funcionamiento	C

3.4. Metodología de cálculo de emisiones

Una vez recopilada la información, estructurada de forma ordenada a través del inventario y definidos los factores de emisión, es el momento de incorporar las fórmulas que permiten obtener el cálculo de la huella de carbono de forma independiente para cada unidad en los escenarios definidos.

Los resultados se expresan inicialmente en kg CO_2e por panel. La huella considerada comprende los módulos A1-A3, A4 y A5.

Se debe aclarar que las normas UNE-EN ISO 14044 y UNE-EN ISO 14067 establecen el marco general para recopilar, validar, relacionar y asignar los datos del inventario a la unidad funcional. La UNE-EN 15804 proporciona la estructura modular empleada para diferenciar la fabricación de los productos, su transporte a obra y el proceso constructivo. Sin embargo, el conjunto de estas normas no define fórmulas específicas para calcular la huella. Las ecuaciones que se presentan a continuación constituyen la aplicación de dichos principios al caso de estudio y se corresponden con las operaciones incorporadas en la hoja de cálculo.

3.4.1. Principio general de cálculo

Las emisiones de cada material o actividad se obtienen multiplicando un dato de actividad (una cantidad) por un factor de emisión compatible:

$$E_{i,p,s} = Q_{i,p,s} \cdot FE_{i,s} \qquad (3.1)$$

donde:

- $E_{i,p,s}$: emisiones de la actividad i, asociadas al panel p y al escenario s, en kg CO_2e
- $Q_{i,p,s}$: cantidad: kg, m³, L, kWh o t·km
- $FE_{i,s}$: factor de emisión correspondiente.
- s : escenario *Ex ante* o *As-built*.

La unidad del dato debe coincidir con la unidad del factor. Por ejemplo, una cantidad expresada en kg solo puede multiplicarse directamente por un factor expresado en kg CO_2e /kg.

Nota: la ecuación (3.1) no se reproduce literalmente de una norma. Es la fórmula adoptada en este trabajo para relacionar los datos del inventario con sus factores de emisión.

3.4.2. Magnitudes geométricas de referencia

Las magnitudes geométricas permiten normalizar los resultados y comprobar las cantidades previstas y ejecutadas.

La superficie y el volumen geométrico se calculan mediante:

$$S_{p,s} = L_{p,s} \cdot H_{p,s} \qquad (3.2)$$

$$V_{p,s} = S_{p,s} \cdot e_{p,s} \qquad (3.3)$$

donde:

- $L_{p,s}$: longitud horizontal, asociadas al panel p y al escenario s.
- $H_{p,s}$: profundidad, asociadas al panel p y al escenario s.
- $e_{p,s}$: espesor, asociadas al panel p y al escenario s

Estas operaciones se incorporan en la hoja 01_PANELES del inventario.

3.4.3. Emisiones de los materiales: módulos A1-A3

Las emisiones A1-A3 de fabricación de los materiales se calculan mediante:

$$E_{p,s} = \sum_{m=1}^{n} Q_{m,p,s} \cdot FE_{m,s} \qquad (3.4)$$

donde:

- m representa cada material incorporado.

En el escenario *As-built*, la imputación del material se realiza sobre la cantidad total suministrada y documentada. Los rechazos y excedentes no se tienen en cuenta para las emisiones debido a que los materiales ya han sido fabricados, por lo que sus emisiones se han generado. Por otro lado, la cantidad que se integra en el panel se registra por separado, con el fin de llevar un control exhaustivo del consumo y analizar las posibles desviaciones.

Estas operaciones corresponden a las fórmulas incluidas en 02_MATERIALES

3.4.4. Emisiones del transporte a obra: módulo A4

Para cada ruta r se calcula el combustible de ida y retorno a partir del número de viajes n, las distancias d y los consumos específicos c:

$$L_r = n_r \times (d_{ida,r} \times c_{ida,r} + d_{ret,r} \times c_{ret,r}) \qquad (3.5)$$

$$E_{A4,p,s} = \sum_{r} \alpha_{r,p,s} \times L_{r,s} \times FE_{gas,s} \qquad (3.6)$$

Las distancias se expresan en km y los consumos en L/km. La proporción α identifica la parte del servicio atribuida a cada código. En la suma de (3.6) solo entran los viajes con imputación a A4.

El trabajo de transporte se expresa en toneladas-kilómetro y se conserva como indicador físico.

$$TKM_{j,p,s} = M_{j,p,s} \cdot \left(D_{\text{ida},j} + K_{ret} D_{\text{retorno},j}\right) \cdot N_j \qquad (3.7)$$

donde:

- $M_{j,p,s}$: masa transportada por viaje en toneladas.
- $D_{\text{ida},j}$: distancia entre el centro de suministro y la obra.
- $D_{\text{retorno},j}$: distancia de retorno considerada.
- N_j : número de viajes.
- K_{ret} : valor estimado, un coeficiente que se aplica al viaje de retorno en vacío. Este coeficiente se define como la relación entre la emisión por vehículo-kilómetro en vacío y la correspondiente al vehículo cargado.

Estas operaciones corresponden a las fórmulas incluidas en 03_TRANSPORTES.

3.4.5. Emisiones de ejecución: módulo A5

Las emisiones de maquinaria se obtienen a partir del combustible medido o asignado a cada panel:

$$E_{\text{gas},p,s} = \sum_r L_{r,p,s} \times FE_{\text{gas},s} \qquad (3.8)$$

k identifica cada equipo o proceso. Cuando existe un consumo global del periodo, se realiza una asignación documentada. Cuando solo existen horas, los litros son una estimación obtenida mediante un consumo horario justificado:

$$L_{\text{estimado}} = h_{\text{funcionamiento}} \times r_{L/h} \qquad (3.9)$$

El cálculo por horas no se añade al consumo medido si ambos representan la misma actividad. Se distingue la duración del proceso del tiempo efectivo de funcionamiento de cada equipo.

$$E_{\text{elec},p,s} = kWh_{p,s} \times FE_{\text{elec},s} \qquad (3.10)$$

$$E_{\text{agua},p,s} = V_{\text{agua},p,s} \times FE_{\text{agua},s} \qquad (3.11)$$

El consumo de agua se expresa en m³.

Las emisiones de los viajes de tierras se suman exclusivamente en A5.3

$$L_{\text{tierras}} = n \times \left(d_{\text{carg}} \times c_{\text{carg}} + d_{\text{vac}} \times c_{\text{vac}}\right) \qquad (3.12)$$

$$E_{A5} = E_{\text{gas}} + E_{\text{elec}} + E_{\text{agua}} + E_{\text{tierras}} + E_{\text{otros}} \qquad (3.13)$$

Estas operaciones corresponden a las fórmulas incluidas en 04_EJECUCION.

3.4.6. Reparto de consumos registrados por jornada

Manejando los datos recopilados de obra, la situación ideal es que cada cantidad pueda asociarse a un único panel. Sin embargo, hay situaciones en las que un albarán que documenta un consumo deba repartirse entre varios paneles. Para documentar como se hace este reparto, está la pestaña 05_ASIGNACIONES. Se evitará el reparto arbitrario y se empleará una magnitud física para calcular un porcentaje de asignación individual por panel sobre el total del conjunto que incorpora el albarán o parte.

La UNE-EN ISO 14044 establece que los procedimientos de asignación deben documentarse, que la suma de los datos asignados debe coincidir con el total original y que, cuando la asignación no pueda evitarse, deben priorizarse relaciones físicas representativas.

Para una jornada o grupo de registros g, la proporción asignada al panel p se calcula como:

$$\alpha_{p,g} = \frac{B_{p,g}}{\sum_{k=1}^{n} B_{k,g}} \qquad (3.14)$$

donde:

- $\alpha_{p,g}$: proporción correspondiente al panel.
- $B_{p,g}$: valor de la base física del panel.
- n : número de paneles incluidos en la jornada.

El consumo asignado será:

$$Q_{p,g}^{\text{asignada}} = Q_g \cdot \alpha_{p,g} \qquad (3.15)$$

El reparto debe cumplir dos condiciones de cierre:

$$\sum_{p=1}^{n} \alpha_{p,g} = 1 \qquad (3.16)$$

$$\sum_{p=1}^{n} Q_{p,g}^{\text{asignada}} = Q_g \qquad (3.17)$$

Estas condiciones garantizan que el consumo original no se pierda ni se contabilice dos veces. Los repartos se documentarán en la tabla incluida en la pestaña 05_ASIGNACIONES

3.4.7. Agregación de la huella por panel

La huella total de cada panel se obtiene sumando los módulos considerados:

$$E_{A1-A5,p,s} = E_{A1-A3,p,s} + E_{A4,p,s} + E_{A5,p,s} \qquad (3.18)$$

Esta operación se encuentra en la pestaña 07_CONSOLIDADO_PANEL, para ambos escenarios: *Ex ante* y *As-built*.

La intensidad de carbono se calcula dividiendo la huella por la superficie correspondiente:

$$I_{p,s}(m^2) = \frac{E_{A1-A5,p,\text{Ex ante}}}{S_{p,s}} \qquad (3.19)$$

$$I_{p,s}\ (m^3) = \frac{E_{A1-A5,p,\text{as-built}}}{V_{p,s}} \qquad (3.20)$$

Los resultados se expresan en kg CO_2e/m² o kg CO_2e/m³ de pantalla.

La huella total del conjunto se obtiene mediante:

$$E_{\text{pantallas},s} = \sum_{p=1}^{n} E_{A1-A5,p,s} \qquad (3.21)$$

Para expresarla en toneladas:

$$E_{\text{pantallas}}(\text{t CO}_2\text{e}) = \frac{E_{\text{pantallas}}(\text{kg CO}_2\text{e})}{1000} \qquad (3.22)$$

3.4.8. Comparación *Ex ante* y *As-built*

La desviación absoluta se calcula mediante:

$$\Delta E_p = E_{A1-A5,p,\text{as-built}} - E_{A1-A5,p,\text{Ex ante}} \qquad (3.23)$$

La desviación relativa es:

$$\Delta E_{p,\%} = \frac{E_{A1-A5,p,\text{as-built}} - E_{A1-A5,p,\text{Ex ante}}}{E_{A1-A5,p,\text{Ex ante}}} \cdot 100 \qquad (3.24)$$

Un valor positivo indica que las emisiones reales son superiores a las previstas. Un valor negativo indica una huella inferior a la estimada. Cuando no exista un valor *Ex ante* válido, no se calculará la desviación porcentual.

Como indicador complementario se obtiene el sobreconsumo de hormigón:

$$SC_p = \frac{V_{\text{geométrico real},p}}{V_{\text{geométrico previsto},p}} \cdot 100 \qquad (3.25)$$

El sobreconsumo permite analizar una de las posibles causas de la diferencia entre los escenarios.

3.4.9. Evaluación de la calidad del dato y propagación del Nivel de Certeza

La metodología propuesta incorpora unos niveles de certeza LoC descritos en el punto 3.2.7, que son indicadores de calidad del dato. Permiten identificar el grado de confianza de los datos empleados en cada resultado. Cada dato se clasifica mediante un nivel de certeza (LoC Level of Certainty).

En la tabla de cada pestaña de la hoja de cálculo, se recoge junto al dato el nivel de certeza, el tipo de fuente y la referencia documental.

Se establen los criterios para determinar el LoC de un cálculo que tiene en sus datos diferentes niveles de certeza: se adopta como LoC del resultado el nivel menos favorable de los datos que intervienen. Por ejemplo, una cantidad LoC-A multiplicada por un factor de emisión LoC-B produce un resultado LoC-B. De forma general:

$$LoC_i = \min\left(L, oC_{\text{actividad},i} LoC_{\text{factor},i}\right) \qquad (3.26)$$

donde el operador mínimo se interpreta conforme al orden de calidad:

$$LoC\text{-A} > LoC\text{-B} > LoC\text{-C}$$

Para resultados agregados, como la huella total de un panel o del conjunto de pantallas, se aplica un criterio conservador: el resultado adopta el nivel menos favorable entre las contribuciones con emisiones distintas de cero.

$$LoC_{\text{total},s} = \min_{i:E_{i,s}>0}\left(LoC_{i,s}\right) \qquad (3.27)$$

Por tanto, si la huella total incluye contribuciones LoC-A, LoC-B y LoC-C, su clasificación global será LoC-C. Este criterio puede resultar excesivamente conservador, puesto que una contribución de baja certeza que representa una fracción reducida de la huella definiría la calidad del resultado. Por este motivo, el LoC global se complementa con la distribución porcentual de las emisiones según su nivel de certeza, respecto a la emisión total de la pantalla.

Para cada escenario s, el porcentaje de emisiones correspondiente al nivel k se calcula mediante:

$$P_{LoC-k,s} = \frac{\sum_{i:LoC_i=k} E_{i,s}}{E_{\text{total},s}} \cdot 100 \; k \in \{A, B, C\} \qquad (3.28)$$

debiéndose cumplir:

$$P_{LoC-A,s} + P_{LoC-B,s} + P_{LoC-C,s} = 100\% \qquad (3.29)$$

Estos porcentajes se calculan ponderando la contribución en kg CO_2e de cada registro. Un ejemplo que podría obtenerse:

Huella total *As-built*: 86.063 kg CO_2e; LoC global: LoC-C; distribución de certeza: 82 % LoC-A, 13 % LoC-B y 5 % LoC-C.

La hoja de cálculo automáticamente obtiene el LoC global y los porcentajes LoC-A, LoC-B y LoC-C tanto para cada panel como para el conjunto de las pantallas.

3.4.10. Comprobaciones del cálculo

Antes de aceptar los resultados se verificará:

- Coincidencia entre las unidades del dato y del factor.
- Separación entre A1-A3, A4 y A5.
- Ausencia de doble contabilización.
- Utilización de cantidades realmente incorporadas.
- Correcta valoración de LoC.
- Identificación de estimaciones y datos asignado.
- Trazabilidad de cada factor.
- Conservación de los datos ausentes como valores no disponibles y no como cero.

La UNE-EN ISO 14044 exige que las entradas y salidas asignadas mantengan el balance del proceso original y que los métodos se apliquen de forma coherente.

3.4.11. Estructura del inventario

El archivo del inventario sigue la siguiente estructura:

Tabla 17. Correspondencia entre los cálculos y la hoja de cálculo. (Elaboración propia)

Cálculo	Hoja
Geometría del panel	01_PANELES
Fabricación de materiales A1-A3	02_MATERIALES
Transporte de materiales A4	03_TRANSPORTES
Maquinaria y electricidad A5	04_EJECUCIÓN
Repartos de consumos	05_ASIGNACIONES
Registro de los factores	06_FACTORES EMISIÓN
Huella total e intensidad por panel	07_CONSOLIDADO PANEL

3.5. Técnicas de inteligencia artificial empleadas

El conjunto de datos recopilados durante la ejecución de las pantallas tiene un volumen adecuado para emplear técnicas de Inteligencia artificial sobre los mismos. Esta aplicación permitirá complementar los resultados obtenidos de la aplicación del ACV. Las técnicas de inteligencia artificial incorporadas son cuatro: Isolation Forest, K-Means, Random Forest y SHAP. Las cuales no sustituyen las fórmulas ni modifican los factores de emisión definidos en los apartados anteriores.

Sus algoritmos están disponibles en formato abierto y accesible para cualquier persona. Son probadas librerías de Python, que han sido utilizadas en diferentes campos de la ciencia para el análisis de grandes muestras de datos. Isolation Forest, K-Means y Random Forest se implementan mediante la librería scikit-learn, mientras que SHAP dispone de una librería específica, con su mismo nombre, para la interpretación de modelos. En ninguno de los casos, se ha programado específicamente para este trabajo un algoritmo de Inteligencia artificial. Se han integrado en la aplicación, desde la cual se puede configurar diferentes aspectos de las pantallas analizados.

Los motivos de realizar esta selección de algoritmos, responde al tipo y a la cantidad de información disponible. El inventario contiene principalmente datos numéricos y tabulares: dimensiones, cantidades de materiales, transportes, consumos y emisiones por pantalla, además, se trata de un conjunto de tamaño moderado. Por este motivo, se descartan modelos más complejos, como las redes neuronales, que suelen requerir muchos más datos y resultan más difíciles de interpretar.

Isolation Forest, K-Means y Random Forest son técnicas de aprendizaje automático o machine learning. Esto significa que identifican relaciones y

patrones a partir de los datos, en lugar de limitarse a aplicar reglas fijadas previamente.

SHAP cumple una función diferente ya que no realiza predicciones, sino que permite comprender cómo se han obtenido.

3.5.1. Isolation Forest

Isolation Forest es un algoritmo de aprendizaje no supervisado utilizado para detectar anomalías que no necesita que el usuario indique previamente qué registros son normales y cuáles deben considerarse excepcionales. El propio algoritmo analiza la distribución de los datos e identifica los casos que se alejan del comportamiento habitual.

Para ello construye varios árboles de decisión de forma aleatoria. Los registros poco frecuentes suelen quedar separados del resto con un número reducido de divisiones. Cuanto más fácil resulta aislar un dato, mayor es la probabilidad de que presente un comportamiento anómalo.

En este trabajo se emplea para localizar pantallas con valores atípicos en sus cantidades, consumos, emisiones o desviaciones entre los resultados *As-built*, permitiendo centrar la revisión en un número reducido de casos, en lugar de analizar todas las pantallas con el mismo nivel de detalle.

Se selecciona frente a métodos basados en límites fijos porque puede estudiar varias variables de forma conjunta. Aun así, su resultado debe entenderse únicamente como una señal de aviso. El algoritmo detecta que una pantalla es diferente, pero no puede determinar si la causa es un error de registro, una condición geotécnica concreta o una circunstancia real de la ejecución.

3.5.2. K-Means

K-Means es otro algoritmo de aprendizaje no supervisado. Su finalidad es formar grupos de registros con características similares. En el caso estudiado, permite organizar las pantallas teniendo en cuenta variables relacionadas con su geometría, sus consumos y su perfil de emisiones.

El proceso parte de un número de grupos establecido previamente. El algoritmo calcula un centro para cada uno y asigna cada pantalla al centro más próximo. Después vuelve a calcular esos centros y repite la operación hasta que las agrupaciones se mantienen estables.

Esta clasificación facilita la comparación entre pantallas semejantes. Una pantalla de mayor profundidad o volumen puede tener una huella total más elevada sin que ello implique necesariamente una ejecución menos eficiente. Al compararla con otras de características parecidas, el análisis resulta más equilibrado y útil.

K-Means se eligió por su sencillez, su rapidez y la facilidad con la que pueden representarse sus resultados. Los grupos obtenidos no deben interpretarse como categorías universales de buena o mala ejecución. Son agrupaciones internas del conjunto analizado y sirven, sobre todo, para reconocer comportamientos diferentes dentro de la obra.

3.5.3. Random Forest

Random Forest es un algoritmo de aprendizaje supervisado utilizado para realizar predicciones. A diferencia de los métodos anteriores, necesita ejemplos en los que se conozcan tanto los datos de entrada como el resultado real. En este caso, el modelo se entrena con pantallas ejecutadas cuya huella *As-built* ya ha sido calculada.

El algoritmo construye numerosos árboles de decisión utilizando diferentes combinaciones de registros y variables. Cada árbol obtiene su propia estimación. La predicción final se calcula combinando todos esos resultados, lo que reduce la dependencia de un único árbol y mejora la estabilidad del modelo.

Su aplicación permite utilizar la experiencia de las pantallas ya ejecutadas para estimar la huella de otras pantallas. Cuando se dispone posteriormente del valor real, pueden compararse tres resultados: el cálculo inicial *Ex ante*, la predicción del modelo y la huella *As-built*. Esta comparación permite comprobar si el modelo mejora la estimación de proyecto y cuantificar el error obtenido.

Random Forest se selecciona porque se adapta bien a conjuntos de datos tabulares de tamaño moderado y puede representar relaciones que no son completamente lineales. Además, ofrece resultados sólidos sin exigir una configuración excesivamente compleja. Para evaluar correctamente su capacidad predictiva, las pantallas empleadas en la validación se mantienen separadas de las utilizadas durante el entrenamiento.

3.5.4. SHAP

SHAP es una técnica de interpretación aplicada a las predicciones de Random Forest. Su función es explicar cómo ha influido cada variable en el resultado calculado por el modelo. Esto resulta especialmente importante cuando se quiere utilizar la predicción como apoyo a una decisión técnica.

Para una pantalla concreta, SHAP indica qué variables han contribuido a aumentar la estimación y cuáles han ayudado a reducirla respecto al valor de referencia del conjunto. Así, una predicción elevada puede relacionarse, por

ejemplo, con una mayor cantidad de hormigón, una distancia de transporte superior o un consumo previsto más alto.

El análisis también puede realizarse de forma global. En ese caso, SHAP permite reconocer qué variables tienen mayor peso en el conjunto de predicciones. Esta información ayuda a entender el comportamiento general del modelo y permite dirigir la atención hacia los aspectos más relevantes desde el punto de vista de las emisiones.

SHAP se incorporó para evitar que Random Forest funcione como una caja negra. No obstante, sus resultados deben interpretarse con prudencia. La técnica explica cómo utiliza el modelo cada variable, pero no demuestra por sí sola que exista una relación directa de causa y efecto. Tampoco calcula los posibles ahorros, que continúan obteniéndose mediante las fórmulas del ACV.

3.5.5. Integración de las técnicas en la aplicación

Las cuatro técnicas descritas en el apartado anterior se integran en la aplicación de manera complementaria, resumiendo sus funciones del siguiente modo:

- Isolation Forest: identifica observaciones con un comportamiento atípico respecto al conjunto analizado.
- K-Means: agrupa pantallas con características y comportamientos semejantes.
- Random Forest: estima la huella de carbono *As-built* a partir de información disponible antes de la ejecución.
- SHAP: permite interpretar las predicciones de Random Forest, identificando la contribución de cada variable al resultado estimado.

Estas técnicas se complementan entre sí y permiten analizar los datos de obra desde diferentes perspectivas, proporcionando información adicional que facilita la identificación de comportamientos singulares, patrones y relaciones entre las variables analizadas. Su incorporación amplía, por tanto, las posibilidades de análisis del inventario sin modificar el procedimiento físico de cálculo de las emisiones. Los resultados obtenidos mediante los algoritmos deben revisarse siempre teniendo en cuenta las circunstancias de ejecución reales y la información técnica disponible.

3.6. Metodología de la aplicación

En los apartados anteriores, se ha definido una metodología para estructurar los datos reales de obra (*As-built*) y los datos estimados al inicio del proyecto (*Ex ante*), usándolos para calcular con la ayuda de una hoja de cálculo los valores de emisiones de cada panel ejecutado, pudiéndose obtener las desviaciones entre los valores estimados y los reales. Posteriormente, se han elegido e implementado unos algoritmos de inteligencia artificial para realizar análisis y predicciones a partir de los datos recopilados. Como complemento a todo lo anterior, se desarrolla una aplicación prototipo con ayuda de la IA, destinada a integrar en un único entorno:

- El inventario de datos.
- Los cálculos de las emisiones de carbono de los paneles.
- El análisis de las desviaciones.
- Evaluación de medidas reductoras.

Cuya finalidad es facilitar en obra a los técnicos el cálculo, análisis y toma de decisiones con un software autónomo.

3.6.1. Objetivo y alcance de la aplicación

El principal objetivo de la aplicación es facilitar el seguimiento de la huella de carbono de unidades de obra y entregar al equipo de obra una herramienta intuitiva y de fácil manejo que facilita el cálculo y gestión de la huella de carbono en obra.

La aplicación permite trabajar a escala de elemento individual y mostrar los resultados de forma individual o de todo el conjunto.

Se presupone que los potenciales usuarios serán responsables ambientales, técnicos de oficina técnica o producción.

La aplicación presenta una interfaz diseñada para que resulte fácil la introducción de datos. Para ello emplea formularios, filtros, tablas y gráficos sin necesidad de modificar ninguna fórmula interna.

La aplicación debe comparar dos situaciones:

- El escenario *Ex ante*: basado en las estimaciones iniciales de la obra.
- El escenario *As-built*: cantidades, distancias y consumos reales obtenidos en obra.

Como resultado muestra las desviaciones entre las previsiones y la ejecución real, los parámetros que más peso tienen, detecta anomalías y propone mejoras para reducir las futuras emisiones de otras pantallas que estén pendientes de ejecutar en la obra. Se consideran los módulos comprendidos entre A1-A5.

Gráficamente entrega gráficos de resultados y da la posibilidad de incluir sobre un plano en planta la distribución de los distintos valores obtenidos en

los cálculos del ACV y de la aplicación de Inteligencia artificial. Esta representación georreferenciada facilita la compresión de los resultados aportando un punto de vista espacial. Su alcance debe entenderse como el de un prototipo funcional, para ser una versión comercial, sería necesario probarla en varios proyectos antes del inicio de estos, consiguiendo mejorar sus prestaciones y puliendo sus posibles fallos.

3.6.2. Arquitectura y flujo de información

La aplicación se organiza en cuatro etapas: entrada de datos, validación, cálculo y presentación de resultados.

Los datos se pueden introducir importando el archivo EXCEL definido en la metodología de este trabajo, el cual ordena y estructura la información. También se pueden introducir de forma totalmente autónoma, añadiendo manualmente cada dato desde la propia aplicación. Toda la información se estructura en tablas que contienen las cantidades, consumos, factores de emisión y cualquier variable anteriormente definida.

Una vez completada la carga e introducción de los datos, la aplicación realiza controles básicos de integridad. Entre ellos se comprueba la existencia de códigos de pantalla, la presencia de los factores de emisión necesarios, la coherencia de unidades y la disponibilidad de cantidades suficientes para efectuar los cálculos. Los avisos no sustituirán ninguna revisión técnica, pero permiten detectar registros incompletos antes de proceder a realizar los cálculos y análisis.

Posteriormente, realiza el cálculo de ACV en base a las fórmulas desarrolladas en la metodología de este trabajo. Lo hace automáticamente sin tener que dar ninguna instrucción.

El flujo general puede resumirse de la siguiente manera:

Inventario Excel o entrada manual → Validación de datos → Cálculo A1-A5 → Agregación por pantalla y proyecto → Análisis, inteligencia artificial y optimización → Exportación de resultados.

Los proyectos se podrán guardar en un archivo con extensión .acvproj para posteriormente poder continuar con el trabajo. Este fichero conservará todo el inventario, la configuración del proyecto y los resultados obtenidos.

El lenguaje de programación elegido para realizar la aplicación es Python, ya que es un lenguaje de propósito general que se caracteriza por una sintaxis clara y sencilla. Presenta una amplia utilización en el desarrollo de aplicaciones para tratamiento de datos, cálculos matemáticos y empleo de inteligencia artificial. Un punto muy fuerte en su elección es que posee librerías especializadas y ampliamente contrastadas de los algoritmos empleados en este trabajo (Isolation Forest, K-Means, Random Forest). Es un lenguaje de código abierto, siendo esta otra de las principales fortalezas. Por ello, dispone de una comunidad internacional muy numerosa y colaboradora. Facilitando el desarrollo y mejora futura de la aplicación.

Para construir la interfaz gráfica de usuario se utiliza Streamlit. Es un entorno de desarrollo de código abierto que permite crear aplicaciones web interactivas directamente a partir de Python. La principal ventaja es que se evita de este modo desarrollar por separado una interfaz compleja. Streamlit permite transformar el motor de cálculo y análisis en una aplicación visual atractiva y sencilla que facilite el trabajo a cualquier técnico de obra. Al igual que Python, el uso de Streamlit está muy extendido y también hay una gran

comunidad detrás de la plataforma. Hecho que facilita la resolución de problemas y la integración de nuevas herramientas futuras.

3.6.3. Funcionalidades principales

La aplicación se estructura en diferentes módulos de trabajo que guardan relación entre sí. La relación entre los módulos sigue un flujo de trabajo ordenado.

El módulo de inventario como cualquier software de datos, permite la introducción, visualización y edición de cualquier valor.

El módulo de asignaciones permite repartir consumos o cantidades comunes entre varias unidades siguiendo los criterios de la metodología desarrollada en el trabajo. La aplicación comprueba que la suma de las cantidades repartidas siempre sea igual al 100% de la cantidad de origen.

El módulo de cálculo ACV, realiza las operaciones automáticamente a partir de las mismas fórmulas incluidas en la metodología. El usuario puede consultar tanto los valores agrupados, como el detalle de las operaciones correspondientes a una unidad concreta.

A partir de los resultados, se comparan los escenarios *Ex ante* y *As-built* mediante diferentes indicadores, tablas y gráficos. La aplicación calcula la desviación absoluta y relativa, la intensidad de carbono y la contribución de cada módulo a la huella total.

Para identificar la calidad de los datos empleados, el software también incorpora el nivel de certeza (LOC). Todo ello bajo el mismo criterio expuesto en la metodología.

Tiene un módulo DXF que facilita la incorporación de un plano en planta de las pantallas. La aplicación es capaz de identificar cada una de ellas en el plano y asociarla con sus datos y resultados. Establecidas las relaciones, mostrará los resultados sobre el plano mediante colores y diferentes etiquetas. La visualización facilitará la identificación de que pantallas tienen más peso en la huella agregada o cuales presentan desviaciones importantes e incluso resultados anómalos.

Los resultados obtenidos con el algoritmo Random Forest pueden interpretarse mediante SHAP, que muestra las variables que han contribuido en mayor medida a cada predicción. La aplicación permite elegir las unidades que se emplearán para entrenar el modelo y cuales se utilizarán de prueba o comprobación. Al separarlas, se evita que los datos de validación se empleen en el aprendizaje.

También cuenta con un módulo de informes, para exportar los resultados a formatos como EXCEL y CSV.

3.6.4. Sistema de apoyo en la toma de decisiones

La aplicación incorpora un módulo específico que facilita la toma de decisiones en referencia a intentar reducir las emisiones de carbono de las pantallas. El sistema modeliza distintos escenarios y sus posibles resultados empleando tanto el módulo de IA como directamente variaciones directas en los valores con los que las fórmulas de trabajo calculan las emisiones.

La finalidad del módulo es colaborar con el técnico para identificar donde es más eficaz adoptar una medida para reducir la huella de carbono.

Dentro del módulo se define el alcance. El usuario puede elegir una determinada unidad, un grupo, las unidades pendientes de ejecutar o cualquier otro conjunto. Seguidamente puede elegir las medidas que desea simular, por ejemplo:

- Reducción del consumo de materiales.
- Disminución de la distancia de transporte.
- Modificación del factor de retorno.
- Reducción del consumo de gasóleo.
- Reducción del consumo eléctrico.

El inventario original siempre permanece fijo sin variaciones. La aplicación crea un escenario alternativo, recalcula las emisiones y compara el resultado con la situación de referencia. Para cada propuesta se muestra el ahorro estimado en kg CO_2e, el porcentaje de reducción y el módulo afectado.

La aplicación muestra de forma separada la huella *Ex ante*, la huella *As-built* disponible, la predicción y la referencia utilizada, evitando interpretar como reales resultados que todavía son estimaciones.

Además, la incorporación de SHAP, ordena las diferentes alternativas de reducción de emisiones en función de las predicciones del algoritmo Random Forest, evaluando las variables que más condicionan a este.

Para la decisión final, el técnico competente deberá considerar la viabilidad técnica, económica y logística de cada propuesta. La aplicación se propone como una herramienta de registro, cálculo, diagnóstico y simulación, pero nunca como un sistema automático de decisiones.

CAPÍTULO 4:
DESARROLLO

4.1. Caso de estudio

El caso de estudio se presenta de forma anonimizada por razones de confidencialidad de datos.

El desarrollo de este capítulo aplica la metodología definida en el capítulo anterior en una obra tipo estación de metro subterráneo, situada en España dentro del entorno urbano. La información técnica utilizada procede de documentación real del proyecto y de la ejecución de la obra. Se ha anonimizado para que el análisis se centre exclusivamente en el comportamiento constructivo y ambiental.

4.1.1. Descripción de la obra

La estación analizada responde a una tipología subterránea ejecutada mediante un recinto de contención perimetral. Dentro del conjunto de la obra civil, el estudio se centra en las pantallas continuas de hormigón armado, consideradas como unidades repetitivas que permiten comparar geometría, cantidades, transportes, consumos y emisiones a escala individual. Esta decisión se debe a que es la unidad de la que se dispone de datos completos de ejecución de obra en el momento de redacción de este trabajo.

La descripción escrita omite la ubicación concreta y los identificadores del contrato. Las denominaciones de proveedores solo se mantienen cuando son necesarias para justificar una fuente ambiental.

4.1.1.1. Proceso constructivo

El proceso constructivo para la ejecución de la estructura de la estación de la obra es el siguiente:

- Ejecución de pantallas perimetrales.
- Ejecución contra el terreno de la losa de cubierta.
- Excavación bajo losa de cubierta y ejecución de losa nivel-1.
- Excavación bajo losa de cubierta y ejecución de losa nivel-2.
- Excavación bajo losa de cubierta y ejecución de losa nivel-3.
- Excavación hasta nivel de contrabóveda y ejecución de esta.

La construcción comienza con la preparación de la zona de pantalla y la ejecución de los elementos guía necesarios para controlar la geometría de la excavación. La excavación del panel se realiza principalmente mediante hidrofresa con lodos bentoníticos para el sostenimiento del terreno.

Una vez alcanzada la profundidad prevista se procede a la limpieza del panel (sustitución de la bentonita), colocación de la armadura mediante grúa y hormigonado con tubo tremie.

Las tierras procedentes de la excavación se cargan en bañeras y se trasladan a instalaciones externas de gestión o acopio.

4.2. Inventario de datos

El inventario se organiza siguiendo la metodología propuesta en un archivo Excel estructurado en tablas relacionadas por el código de panel. El archivo conserva los datos de partida, las reglas de asignación, el registro de factores de emisión y un consolidado final panel a panel. La estructura permite recalcular el conjunto cuando se modifica una cantidad, una distancia o un factor sin perder la trazabilidad del dato original.

4.2.1. Escenarios de inventario y fuentes documentales

Se desarrollan tres escenarios de cálculo: *Ex ante* Proyecto, *Ex ante* Modificado y *As-built*. La necesidad de introducir dos escenarios *Ex ante* se debe a que la tipología de las pantallas de proyecto se optimiza estructuralmente en el Proyecto Modificado, por lo que es necesario contemplar este nuevo escenario.

- *Ex ante* Proyecto: situación inicial del proyecto adjudicado.
- *Ex ante* Modificado: proyecto que recoge los cambios introducidos para optimizar o rediseñar el proyecto original.
- *As-built*: construido con los datos recopilados en obra y la información realmente ejecutada y registrada en obra.

Esta estructura permite observar no solo la huella final, sino también cómo ha evolucionado respecto a lo previsto.

La comparación entre los tres escenarios permite separar el efecto de los cambios de proyecto del efecto de la ejecución, de este modo, no se atribuyen al proceso constructivo desviaciones que en realidad proceden de una modificación previa del diseño.

En los escenarios *Ex ante* se utilizan de sus correspondientes proyectos las mediciones, precios descompuestos y la geometría del presupuesto y de los planos.

Para el escenario *As-built* se utilizan albaranes de suministros, planillas de acero, registros de bentonita, documentación de transportes, distancias a obra, partes de trabajo y fichas de materiales y maquinaria.

Los datos se introducen separados por escenarios para evitar que se altere la línea base de proyecto, de esta manera, los tres escenarios conservan los datos de forma independiente.

Cada entrada incorpora un Nivel de Certeza (LoC) y la referencia documental cuando resulta posible.

4.2.2. Geometría del panel. Características de las pantallas

En el archivo del inventario la hoja 01_PANELES contiene una tabla con 133 filas que se corresponden con los paneles de las pantallas, una fila de "REPERFORACIONES" para contabilizar las reperforaciones contempladas en el Modificado al no ser posible su asociación a un panel, y una fila "GENERAL" donde imputar registros que no se pueda realizar un reparto de forma segura. Los códigos de panel "5 Y 6" y "92 Y 93" se deben a paneles dobles que se ejecutan como una única unidad. Esto explica que la numeración de los paneles llegue a 135 y no produzca 133 observaciones.

El recinto de las pantallas se divide en dos sectores:

- Caja principal: pantallas 1-102.
- Caja norte: 103-135.

La profundidad media de la caja principal es de 44,91 m y de la caja norte 18,85 m.

Tabla 18. Volumen medio de los paneles por recinto. (Elaboración propia)

Recinto	N.º de paneles	Volumen total (m³)	Volumen medio por panel (m³)
Caja principal	100	16.820,30	168,20
Caja norte	33	2.636,06	79,88
Total	133	19.456,36	146,29

En la siguiente tabla se muestran las superficies y volúmenes totales de cada escenario incluyendo las reperforaciones.

Tabla 19. Superficie y volumen total panel por escenario con reperforaciones. (Elaboración propia)

Magnitud	Unidad	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*
Superficie total (m^2)	m^2	18.905,13	17.603,29	19.521,03
Volumen total (m^3)	m^3	22.186,65	17.489,29	19.456,36

Los paneles 126, 127 y 128 se ejecutan con cuchara mientras que el resto se ejecuta con hidrofresa.

En el Anexo 1 se puede consultar en el inventario esta hoja y las características principales de cada panel.

4.2.3. Fabricación de materiales A1-A3

Se contemplan los siguientes materiales:

- Acero
- Hormigón
- Bentonita
- Mortero

En el archivo del inventario la hoja 02_MATERIALES contiene el registro de los suministros en los distintos escenarios.

Tabla 20. Número de registros por material y escenario de la hoja 02_MATERIALES. (Elaboración propia)

Material	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*	Total
Acero	148	148	233	529

Material	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*	Total
Hormigón	148	149	2.480	2.777
Bentonita	148	150	133	431
Mortero	0	0	147	147
TOTAL	**444**	**447**	**2.993**	**3.884**

El **hormigón** se registra a partir de cantidades teóricas para los escenarios *Ex ante* y de albaranes para el *As-built*.

La cantidad suministrada se conserva para la carga ambiental de A1-A3, ya que el producto ha sido fabricado, mientras que las diferencias con la cantidad incorporada se utilizan como control del consumo.

El **acero** se incorpora en los escenarios *Ex ante* a partir de las mediciones teóricas teniendo en cuanta la cuantía del proyecto. En el *As-built* se utilizan los albaranes de las planillas suministradas.

La **bentonita** se incluye en los escenarios *Ex ante* a partir de las mediciones teóricas y la cuantía contemplada en el descompuesto del proyecto. En el *As-built* se incorpora mediante suministro y criterios de reparto cuando la documentación no permite asignación directa por panel.

El **mortero** se incluye en el escenario *As-built* mediante albaranes de suministro para poder contabilizar el efecto que supone el relleno de las reperforaciones.

En la siguiente tabla se muestra un resumen con las cantidades de cada material registradas en cada escenario:

Tabla 21. Cantidad total registrada por material y escenario. (Elaboración propia)

Material	Unidad	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*
Acero	kg	2.716.839,30	2.519.483,22	3.020.920,29

Material	Unidad	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*
Hormigón	m³	22.186,65	17.573,12	18.550,50
Bentonita	kg	44.573,79	52.467,87	326.400,00
Mortero	m³	0,00	0,00	1.392,00

Cuando un suministro afecta a varios paneles se utiliza una base física documentada para su distribución.

En el escenario *As-built* se diferencia la cantidad suministrada, rechazada, sobrante y la atribuida al panel quedando del siguiente modo:

Tabla 22 Cantidad suministrada, rechazada, sobrante e incorporada por material en el *As-built*. (Elaboración propia)

Material	Unidad	Cantidad suministrada	Cantidad rechazada	Cantidad sobrante	Cantidad panel
Acero	kg	3.020.920,29	0,00	0,00	3.020.920,29
Hormigón	m³	18.550,50	263,00	59,50	18.228,00
Bentonita	kg	326.400,00	0,00	0,00	326.400,00
Mortero	m³	1.392,00	0,00	0,00	1.392,00

4.2.4. Transporte de materiales

En la hoja 03_TRANSPORTES del archivo del inventario se registran los suministros que llegan a obra como A4. El transporte de tierras se registra como A5.3 en la misma hoja, sin embargo, sus emisiones se contabilizan en A5 porque corresponde a un flujo generado durante la ejecución y no a la llegada de un producto a la obra.

Tabla 23. Número de registros por material y escenario de la hoja 03_TRANSPORTES. (Elaboración propia)

Material	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*	Total
Acero	133	133	171	437
Hormigón	148	150	2.474	2.772
Bentonita	133	134	133	400

Material	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*	Total
Mortero	0	0	147	147
Gasoil	0	0	93	93
Tierras	133	134	1.281	1.548
Total	**547**	**551**	**4.299**	**5.397**

Para ambos tipos de transporte se recopilan el material o flujo transportado, origen/destino, distancias de ida y retorno, tipo de vehículo, número de viajes, estado cargado o vacío de cada trayecto, documento de procedencia y criterio de asignación al panel.

Se consideran los transportes de los principales materiales que son el acero, hormigón, bentonita, mortero, gasoil y tierras.

Tabla 24. Número de viajes por material y escenario en la hoja 03_TRANSPORTES. (Elaboración propia)

Material / flujo	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*
Acero	98	206	171
Hormigón	2.871	2.268	2.474
Bentonita	3	3	18
Mortero	0	0	147
Gasóleo	0	0	93
Tierras	2.378	1.724	3.269
Total	**5.350**	**4.201**	**6.172**

Los viajes logísticos desde una base externa hasta la obra se mantienen cuando están documentados, aplicando el consumo de vacío en ambos trayectos cuando están sin carga.

El trabajo en t·km se conserva como indicador físico de control, pero no se emplea para calcular las emisiones.

Para A4 se recopilan los recorridos de llegada de materiales y combustible a la obra. Se registran de forma independiente las distancias de ida y de retorno y se fija para cada tipología de vehículo el consumo específico cargado y vacío.

Tabla 25. Recorridos suministro, tipología vehículo y consumos específicos empleados en A4. (Elaboración propia)

Material / flujo	Escenario	Suministrador / Centro	Ida (km)	Retorno (km)	Vehículo	Consumo (L/km) cargado / vacío
Acero	P / M / AB	ACERO A	34,4	34,4	Tráiler largo	0,41 / 0,25
Acero	AB	ACERO B	36,8	56,6	Tráiler largo	0,41 / 0,25
Bentonita	P / M / AB	BENTONITA	60,7	58,9	Cisterna	0,41 / 0,25
Hormigón	P / M / AB	HORMIGÓN A PLANTA 1	7,5	7,1	Hormigonera	0,70 / 0,34
Hormigón	AB	HORMIGÓN B	6,9	6,6	Hormigonera	0,70 / 0,34
Hormigón	AB	HORMIGÓN A PLANTA 2	11,3	10,9	Hormigonera	0,70 / 0,34
Mortero	AB	HORMIGÓN A PLANTA 1	7,5	7,1	Hormigonera	0,70 / 0,34
Mortero	AB	HORMIGÓN B	6,9	6,6	Hormigonera	0,70 / 0,34
Mortero	AB	HORMIGÓN A PLANTA 2	11,3	10,9	Hormigonera	0,70 / 0,34
Gasóleo	AB	GASÓLEO A	13,3	10,5	Cisterna	0,41 / 0,25
Gasóleo	AB	GASÓLEO B	52,0	50,3	Cisterna	0,41 / 0,25
Tierras	P / M / AB	CENTRO DE TIERRAS A	21,0	20,2	Bañera articulada	0,41 / 0,25
Tierras	AB	CENTRO DE TIERRAS B	41,0	41,0	Bañera articulada	0,41 / 0,25
Tierras	AB	CENTRO DE TIERRAS C	44,5	48,7	Bañera articulada	0,41 / 0,25
Tierras	AB	CENTRO DE TIERRAS D	4,0	6,0	Bañera articulada	0,41 / 0,25
Tierras	AB	BASE LOGÍSTICA A	12,1	14,6	Bañera articulada	0,41 / 0,25

Debido a que no se dispone de telemetría específica de los vehículos empleados, estos parámetros se consideran estimaciones y se identifican con un nivel de certeza inferior al de un consumo medido directamente.

A partir de los consumos específicos adoptados, el inventario calcula mediante la ecuación (3.5), el combustible asociado a cada recorrido considerando de forma independiente la distancia recorrida con el vehículo cargado y la distancia recorrida en vacío.

Se aplican los estados de carga definidos en la siguiente tabla:

Tabla 26. Distancias, estado de carga y consumos de las rutas. (Elaboración propia)

Planta / centro de origen o destino	Estado ida / retorno	Ida (km)	Retorno (km)	Consumos base cargado / vacío
HORMIGÓN B	Cargado / vacío	6,9	6,6	0,70 / 0,34
HORMIGÓN A PLANTA 1	Cargado / vacío	7,5	7,1	0,70 / 0,34
HORMIGÓN A PLANTA 2	Cargado / vacío	11,3	10,9	0,70 / 0,34
HORMIGÓN RECHAZADO	Cargado / cargado	Variable	Variable	0,70 / 0,70
ACERO A	Cargado / vacío	34,4	34,4	0,41 / 0,25
ACERO B	Cargado / vacío	36,8	56,6	0,41 / 0,25
BENTONITA	Cargado / vacío	60,7	58,9	0,41 / 0,25
GASÓLEO B	Cargado / vacío	52,0	50,3	0,41 / 0,25
GASÓLEO A	Cargado / vacío	13,3	10,5	0,41 / 0,25
Centro de tierras A	Cargado / vacío	21,0	20,2	0,41 / 0,25
Centro de tierras B	Cargado / vacío	41,0	41,0	0,41 / 0,25
Centro de tierras C	Cargado / vacío	44,5	48,7	0,41 / 0,25
Centro de tierras D	Cargado / vacío	4,0	6,0	0,41 / 0,25

Planta / centro de origen o destino	Estado ida / retorno	Ida (km)	Retorno (km)	Consumos base cargado / vacío
Base logística de tierras	Vacío / vacío	12,1	14,6	0,25 / 0,25

El movimiento asociado a un centro intermedio de montaje se considera ya incluido en la distancia de retorno adoptada y no se añade como viaje adicional.

4.2.4.1. Justificación de los consumos de los transportes

La diferenciación entre trayectos cargados y vacíos responde a que el consumo de combustible de un vehículo pesado depende, entre otras variables, de la masa transportada, del tipo de vehículo, del trazado, de la velocidad y de las condiciones de circulación, por tanto, utilizar un único consumo medio para la ida y el retorno reduciría la representatividad del cálculo. Cuando no se dispone de telemetría o consumo medido de un vehículo concreto se emplean valores de referencia documentados y se mantiene su carácter estimado.

Tabla 27. Consumos específicos de transporte adoptados en el inventario. (Elaboración propia)

Vehículo de referencia	Aplicación	Cargado (L/km)	Vacío (L/km)	Origen del valor	Tratamiento
Hormigonera	Hormigón y mortero	0,70	0,34	Dato facilitado por el suministrador de hormigón y registrado en el inventario	Valor específico de proveedor, se contrasta con bibliografía externa

Vehículo de referencia	Aplicación	Cargado (L/km)	Vacío (L/km)	Origen del valor	Tratamiento
Tráiler largo	Acero	0,41	0,25	Conversión de DESNZ (2024) para HGV articulado >33 t	valor de referencia adoptado de vehículo articulado pesado
Cisterna	Bentonita y suministro de gasóleo	0,41	0,25	DESNZ (2024) para HGV articulado >33 t	Estimación al no disponer de consumo medido de la cisterna real
Bañera articulada	Tierras A5.3	0,41	0,25	Valor específico de proveedor, contrastado con Coyle (2007)	Valor específico de proveedor, se contrasta con bibliografía externa

Los valores anteriores constituyen los parámetros base. El consumo que aparece en cada fila del inventario puede ser distinto porque se calcula como un promedio ponderado por las distancias recorridas en cada estado de carga, por tanto, valores como 0,524 L/km o 0,331 L/km del inventario no representan nuevas hipótesis de consumo, sino el resultado de combinar los parámetros cargado/vacío con las distancias de ida/retorno de cada ruta.

- **Hormigonera:** hormigón y mortero.

  Para la hormigonera se adoptan 0,70 L/km en carga y 0,34 L/km en vacío. Ambos valores proceden de información facilitada por el suministrador de hormigón e incorporada a la tabla de parámetros del inventario. Se trata de un dato específico del suministrador utilizado como hipótesis de cálculo y no de un factor genérico obtenido de una base de datos ambiental.

La utilización de consumos diferenciados resulta coherente con el funcionamiento de este tipo de vehículo. Durante el transporte del hormigón la hormigonera desplaza la carga y mantiene en funcionamiento el tambor, mientras que el retorno se realiza normalmente sin hormigón. Como contraste externo, (Sameer et al., 2019) emplean un consumo medio de 0,48 L/km para el transporte de hormigón preparado mediante camión hormigonera, frente a 0,35 L/km para un camión convencional. Esta referencia no valida de forma exacta los valores 0,70 y 0,34 L/km, porque no reproduce las condiciones específicas de la obra, pero confirma que el consumo de la hormigonera puede ser superior al de un vehículo pesado convencional.

- **Vehículos articulados:** acero, bentonita y suministro de gasóleo.

Para el tráiler largo y la cisterna se adoptan 0,41 L/km en carga y 0,25 L/km en vacío. La fuente principal utilizada en el inventario es el anexo analítico publicado por el Department for Energy Security and Net Zero del Reino Unido. Para vehículos pesados articulados de más de 33 t, *DESNZ (2024)* publica consumos energéticos de 4,09 kWh/km al 100 % de carga y 2,46 kWh/km en vacío. Aplicando el poder calorífico inferior del gasóleo empleado en el inventario, aproximadamente 9,94 kWh/L, estos valores equivalen a 0,411 L/km y 0,247 L/km. El redondeo conduce a los valores adoptados de 0,41 y 0,25 L/km.

La coherencia del orden de magnitud se comprueba con referencias adicionales. Delgado et al. (2017) obtienen para un tractor-semirremolque europeo de 40 t, en un ciclo de distribución regional, consumos de 25,0 L/100 km en vacío, 36,4 L/100 km con una carga representativa y 46,9 L/100 km a plena carga. El valor de 25 L/100 km coincide con la hipótesis de retorno vacío

del inventario y el valor cargado de 41 L/100 km queda situado entre la condición representativa y la plena carga.

Como referencia española, el Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera considera para una cisterna articulada de 40 t un consumo medio de 34,5 L/100 km, con un reparto de explotación del 70 % de kilómetros en carga y el 30 % en vacío (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024). Con los valores adoptados en el inventario esa misma combinación 70/30 daría 36,2 L/100 km. La diferencia, entorno al 5 %, confirma que la hipótesis se encuentra en un orden de magnitud razonable y ligeramente conservador respecto a esta referencia sectorial.

Para el transporte de bentonita y gasóleo se adopta como referencia una tipología de vehículo articulado pesado, ante la ausencia de datos de consumo medidos directamente para los vehículos empleados en obra. Esta aproximación permite diferenciar de forma coherente los consumos asociados a los trayectos realizados con el vehículo cargado y en vacío, aunque no pretende reproducir con exactitud el comportamiento de cada vehículo concreto.

- **Bañeras:** tierras.

Los vehículos utilizados en obra para la retirada de las tierras son bañeras. Desde el punto de vista mecánico, esta aproximación corresponde a un vehículo pesado articulado formado por cabeza tractora y semirremolque basculante.

Se mantienen los consumos de 0,41 L/km cargado y 0,25 L/km vacío. En este caso se invierte el sentido respecto a un suministro A4, el trayecto desde la obra hasta el centro de destino se realiza cargado con tierras y el retorno a la

obra se considera vacío. Cuando se registran desplazamientos logísticos entre la base de los vehículos y la obra sin carga en ninguno de los sentidos se aplica 0,25 L/km a todo el recorrido.

La elección de consumos diferenciados según la carga está respaldada por ensayos específicos de vehículos de transporte de áridos. Coyle (2007), en un estudio realizado para el Department for Transport británico, analiza vehículos basculantes rígidos y un conjunto articulado de 44 t. El informe señala que este tipo de operación suele realizar el trayecto de entrega cargado y regresar vacío. Para el articulado basculante de 44 t obtuvo 10,27 mpg en vacío y 5,51 mpg a masa máxima, equivalentes aproximadamente a 27,5 y 51,3 L/100 km. Estos resultados no se utilizan directamente como parámetros del inventario, pero muestran la influencia de la carga y la variabilidad que puede existir en operaciones reales de movimiento de tierras.

Por tanto, los 0,41 y 0,25 L/km empleados para las bañeras se mantienen como una referencia genérica de vehículo articulado pesado, coherente con DESNZ y con el rango observado en otras publicaciones. La comparación con Coyle también muestra que un basculante real puede presentar consumos superiores en determinadas condiciones, por lo que el valor adoptado no debe presentarse como una medición directa de las bañeras de la obra.

Las bañeras se modelizan con 0,41 L/km para el trayecto cargado y 0,25 L/km para el trayecto vacío. Estos valores los ha aportado la empresa de movimiento de tierras, por lo que se emplean como parámetros de referencia en el inventario y no como consumos medidos directamente en la flota de obra. Su orden de magnitud es coherente con los consumos publicados para vehículos articulados pesados, que se sitúan aproximadamente en 34–35

L/100 km como valor medio de explotación, y con la evidencia de que el consumo aumenta al incrementarse la carga transportada (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).

Las emisiones se calculan con el factor WTW activo de 3,2885 kg CO_2e/L, coherente con el resto de los consumos de gasóleo del inventario.

4.2.5. Maquinaria y electricidad A5

En la hoja 04_EJECUCION se incorporan las horas y consumos de la maquinaria vinculada a la ejecución de los paneles.

Tabla 28. Número de registros por tipo de actividad y escenario en la hoja 05_EJECUCION. (Elaboración propia)

Tipo de actividad	*Ex ante* Proyecto	*Ex ante* Modificado	*As-built*	Total
Excavación	133	133	133	399
Equipo auxiliar	133	134	266	533
Reperforaciones	0	1	0	1
Agua de ejecución	133	134	133	400
Total	**399**	**402**	**532**	**1.333**

Las 69 horas reales de reperforaciones del escenario *As-built* se asignan a los códigos afectados y su consumo queda incorporado en esos paneles. La fila REPERFORACIONES no añade una segunda emisión en el escenario, se conserva para mantener la trazabilidad del inventario y para representar el tratamiento del escenario Modificado.

Se registran independientemente horas de hidrofresa, grúa, equipos de lodos y retroexcavadora. Cuando el consumo no está medido directamente, se obtiene a partir de las horas de funcionamiento y un rendimiento documentado, quedando identificado como estimado.

Tabla 29. Horas totales de los equipos considerados en el módulo A5 por escenario. (Elaboración propia)

Equipo / actividad	***Ex ante* Proyecto (h)**	***Ex ante* Modificado (h)**	***As-built* (h)**
Hidrofresa — perforación	7.387,22	7.911,08	2.101,50
Hidrofresa — reperforación	0,00	149,68	69,00
Grúa — varios	3.868,44	5.753,16	1.295,64
Equipo de lodos — lodos	5.204,50	3.067,40	Consumo medido directamente
Retroexcavadora — Tierras	902,80	749,25	684,10
Grúa — Cuchara	**0,00**	**0,00**	**23,20**

Las pantallas 126, 127 y 128 se ejecutan con cuchara con la grúa, el resto con hidrofresa. La cuchara se emplea únicamente en *As-built* porque en los escenarios *Ex ante* no estaba prevista.

Los consumos de hidrofresa y grúa se distribuyen entre los paneles a partir de las horas de funcionamiento registradas y de los consumos específicos disponibles para cada equipo. El inventario de lodos distribuye un total de combustible por volumen excavado, mientras que la retroexcavadora utiliza una estimación volumen–rendimiento–consumo. El criterio se conserva por equipo y fuente.

Para el cálculo de los consumos de gasóleo del módulo A5 se adoptan valores específicos para cada equipo, diferenciando entre referencias horarias medidas o documentadas y estimaciones utilizadas cuando no se dispone de un consumo directo. La siguiente tabla resume los valores empleados y el criterio seguido para su aplicación en los escenarios *Ex ante* y *As-built*.

Tabla 30. Consumos específicos de referencia adoptados para los equipos del módulo A5. (Elaboración propia)

Equipo / criterio	**Tipo**	**Referencia**	**Consumo adoptado (L/h)**	**Justificación / aplicación**

Hidrofresa 1	Hidrofresa HF1	500 L / 8 h	62,50	Horómetro real. Referencia para la conciliación del consumo *As-built*.
Hidrofresa 2	Hidrofresa HF2	650 L / 8 h	81,25	Horómetro real. Referencia para la conciliación del consumo *As-built*.
Hidrofresa *Ex ante*	Hidrofresa	Media ponderada	71,56	1.477 h de HF1 a 62,5 L/h y 1.382 h de HF2 a 81,25 L/h.
Grúa 1	Grúa	200 L / 8 h	25,00	Horómetro real. Referencia para la conciliación del consumo *As-built*.
Grúa 2	Grúa	200 L / 8 h	25,00	Horómetro real. Referencia para la conciliación del consumo *As-built*.
Equipo de lodos	Planta de lodos	1.200 L / 12 h	100,00	Hipótesis *Ex ante*. En *As-built*, el consumo total se distribuye por volumen excavado.
Retro	Retroexcavadora	Rendimiento to 25 m³/h	8,50	Hipótesis del modelo A5, consumo *As-built* estimado mediante volumen, rendimiento y consumo horario.

La siguiente tabla presenta el desglose del consumo de gasóleo de la maquinaria en el escenario *As-built* y el criterio utilizado para obtener o asignar el consumo correspondiente a cada equipo.

Tabla 31. Desglose del consumo de gasóleo *As-built* de la maquinaria de ejecución. (Elaboración propia)

Equipo / actividad	**Criterio de obtención del consumo *As-built***	**Consumo de gasóleo (L)**
Hidrofresa	Gasóleo conciliado y repartido según horas de perforación y reperforación	230.075,18
Grúa	Gasóleo conciliado y repartido según horas de funcionamiento registradas	80.610,53
Equipo de lodos	Consumo real de campaña distribuido por volumen perforado	212.152,00
Retroexcavadora	Estimación a partir del volumen excavado, rendimiento de 25 m³/h y consumo de 8,5 L/h	5.814,88
Total		**528.652,59**

Consumo de agua:

El agua se utiliza principalmente en la preparación y reposición de lodos bentoníticos en la propia obra, por lo que se considera un recurso del proceso de ejecución de las pantallas y se imputa al módulo A5.

El suministro de agua en el escenario *As-built* es de 21.500 m³. El suministro total se asigna a los paneles proporcionalmente al volumen perforado, incluidas las reperforaciones. Las emisiones asociadas al agua se estiman aplicando un factor de emisión al volumen total suministrado por lo que el resultado es un cálculo agregado y no implica que los 21.500 m³ correspondan al volumen efectivamente vertido.

En el Proyecto y Modificado los consumos de agua son 22.186,65 y 17.489,29 m³ respectivamente con una relación 1:1 entre el agua consumida y el volumen de excavación.

Electricidad:

En la versión validada del inventario el consumo eléctrico contabilizado en A5 es 0 kWh debido a que la obra se alimenta mediante grupos electrógenos. Se mantiene FE-A5-ELECTRICIDAD sin factor numérico aplicado como identificador metodológico.

4.2.6. Asignaciones. Repartos de consumos

Los registros que pueden asociarse directamente a un panel se imputan de forma íntegra. Cuando un dato corresponde a varios paneles se utiliza la pestaña de 05_ASIGNACIONES donde se conserva el total original, la base física del reparto, la proporción individual y la cantidad finalmente asignada. Los controles verifican que la suma de proporciones sea uno y que las cantidades asignadas reproduzcan el total de origen.

La siguiente tabla resume los criterios aplicados para asignar a cada panel los materiales y consumos que no disponen siempre de una identificación directa indicando la base física o documental utilizada en cada reparto.

Tabla 32. Criterios de asignación de materiales y consumos a los paneles. (Elaboración propia)

Módulo	Material / consumo	Criterio de asignación	Base / observación
A1-A3	Hormigón	Directa si el albarán identifica el panel. Si afecta a varios paneles, se documenta el reparto.	Albaranes y volumen asociado.
A1-A3	Acero	Directa si la jaula está identificada. En lotes compartidos, reparto según el peso de los despieces.	Planillas y despieces de armadura.
A1-A3	Bentonita	Reparto entre los paneles vinculados al suministro según volumen y fechas de ejecución.	Volumen del panel, fecha de suministro y albarán.
A1-A3	Mortero	Asignación a los paneles donde se registran reperforaciones.	Albaranes y volumen de relleno.
A4	Transporte de materiales	Asignación al panel asociado al suministro; si afecta a varios, se conserva la proporción correspondiente.	Material, albarán, origen, viajes y código de panel.
A5	Hidrofresa	Reparto del combustible conciliado según horas de perforación y reperforación.	Horas registradas y equipo utilizado.
A5	Grúa	Reparto del combustible conciliado según horas de funcionamiento por panel.	Horas de grúa y equipo utilizado.
A5	Equipo de lodos	Reparto del consumo total proporcionalmente al volumen excavado.	Volumen excavado por panel.
A5	Retroexcavadora	Estimación a partir del volumen excavado, rendimiento y consumo horario.	25 m^3/h y 8,5 L/h.
A5	Agua	Reparto proporcional al volumen perforado, incluidas reperforaciones.	Volumen perforado por panel.
A5	Reperforación con hidrofresa	Asignación directa de las horas reales a los paneles afectados.	Registros de ejecución.
—	Registros no asignables	No se fuerza el reparto, se mantienen como registro general cuando procede.	Código GENERAL, se conserva total y trazabilidad.

4.2.7. Registro de los factores de emisión

En la siguiente tabla se muestran los factores de emisión adoptados para el cálculo:

Tabla 33. Factores de emisión y su fuente/criterio. (Elaboración propia)

Módulo	Material / actividad	Factor adoptado	Unidad	Fuente / Criterio	LoC
A1-A3	Hormigón *Ex ante* y HORMIGÓN B	273	kg CO_2e/m^3	DAP sectorial de hormigón	LoC-C
A1-A3	HORMIGÓN A	200	kg CO_2e/m^3	Valor conservador apoyado en ficha de producto	LoC-B
A1-A3	Acero B500SD *Ex ante*	0,473	kg CO_2e/kg	DAP sectorial España-Portugal	LoC-C
A1-A3	Acero B500SD *As-built*	0,4131	kg CO_2e/kg	DAP del fabricante registrada en el inventario	LoC-B
A1-A3	Bentonita	0,496	kg CO_2e/kg	Valor EFFC/DFI - Ecoinvent	LoC-C
A1-A3	Mortero D-100	326	kg CO_2e/m^3	Valor sectorial documentado	LoC-C
A4/A5	Gasóleo de transporte y maquinaria	3,2885	kg CO_2e/L	Combustión directa TTW	LoC-C
A5	Electricidad	No aplicado	kg CO_2e/kWh	Actividad contabilizada = 0 kWh	N/A

Módulo	Material / actividad	Factor adoptado	Unidad	Fuente / Criterio	LoC
A5	Agua	0,517	kg CO_2e/m^3	Factor integral OCCC 2026; aproximación territorial	LoC-C

4.2.7.1. Justificación de los factores de emisión

Los factores de emisión recogidos en la Tabla 33 se han seleccionado siguiendo el orden de preferencia establecido en el apartado 3.3.2. Siempre que ha sido posible, se han utilizado Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) verificadas correspondientes al producto y fabricante realmente suministrados. Cuando esta información no se encontraba disponible, se ha recurrido, por este orden, a DAP sectoriales o de productos técnicamente equivalentes, bases de datos ambientales reconocidas, factores oficiales nacionales o sectoriales y en último lugar a valores procedentes de literatura técnica o valores proxy documentados.

No se dispone de un único factor de emisión que represente la ejecución completa de un panel de pantalla. Por este motivo, la huella se obtiene desagregando el proceso en los materiales, transportes y consumos que intervienen en los módulos A1-A3, A4 y A5, justificándose individualmente los factores empleados en cada uno de ellos.

Para el hormigón correspondiente a los escenarios *Ex ante* y al suministro B se adopta un factor de 273 kg CO_2e/m^3 para los módulos A1-A3, procedente de la DAP sectorial utilizada como referencia para hormigones de resistencia igual o superior a 30 MPa (ANEFHOP, 2023). Se emplea exclusivamente el valor correspondiente a A1-A3 y no un valor acumulado que incluya el

transporte, ya que las emisiones asociadas al traslado desde la planta hasta la obra se calculan de forma independiente dentro del módulo A4. De esta forma se evita una posible doble contabilización.

Para el hormigón suministrado por la planta A se adopta un factor de 200 kg CO_2e/m^3, obtenido de la documentación comercial correspondiente al producto suministrado. Aunque este valor presenta una mayor especificidad respecto al producto realmente utilizado que el valor sectorial, no procede de una DAP verificada. Por este motivo, se mantiene identificado como una fuente de menor nivel de certeza y su influencia sobre los resultados se analiza en capítulos posteriores. Esta precaución resulta especialmente relevante debido al elevado peso del hormigón en la huella total del caso de estudio. En el escenario *As-built*, 4.448,50 m^3 se calculan con el factor de 273 kg CO_2e/m^3 y 14.102,00 m^3 con el factor de 200 kg CO_2e/m^3.

En el caso del acero B500SD, para el escenario *Ex ante* se emplea un factor sectorial de 0,473 kg CO_2e/kg, al no conocerse inicialmente el fabricante que realizaría el suministro. Para el escenario *As-built* se adopta un factor de 0,4131 kg CO_2e/kg, correspondiente al GWP-total de los módulos A1-A3 declarado en la DAP del fabricante del acero finalmente suministrado (CELSA Barcelona, 2023). La sustitución del valor sectorial por uno específico del fabricante permite mejorar la representatividad del inventario respecto a las condiciones reales de ejecución.

Para la bentonita se utiliza un factor de 0,496 kg CO_2e/kg y para el mortero de relleno de reperforaciones un factor de 326 kg CO_2e/m^3. En ambos casos se emplean valores genéricos o sectoriales de referencia debido a la ausencia de una DAP específica correspondiente al producto realmente suministrado. Esta menor representatividad se refleja mediante su clasificación como LoC-

C. Su contribución a la huella global es inferior a la correspondiente al hormigón y al acero: en el escenario *As-built*, el mortero representa el 5,73 % y la bentonita el 2,04 % de la huella A1-A5, frente al 50,97 % del hormigón y el 15,76 % del acero.

Las emisiones asociadas al gasóleo utilizado en transporte y maquinaria se calculan mediante un único factor de 3,2885 kg CO_2e/L, aplicado de forma homogénea a los consumos registrados o estimados de los distintos equipos. La utilización de un mismo factor permite mantener la consistencia entre procesos que emplean el mismo combustible. En el módulo A5 se priorizan siempre los consumos reales registrados y únicamente se recurre a rendimientos horarios documentados cuando no se dispone de mediciones directas, asignando en esos casos un menor Nivel de Certeza.

Para el agua se adopta un factor de 0,517 kg CO_2e/m^3 procedente de la Oficina Catalana del Canvi Climàtic. Este valor se considera una aproximación territorial y, por tanto, se clasifica como LoC-C. En cuanto a la electricidad, no se incorpora ninguna contribución al cálculo al no haberse registrado consumo eléctrico de red asociado a las actividades consideradas en el inventario.

Como comprobación complementaria, se realiza una estimación simplificada a partir de los dos materiales estructurales con mayor peso. Considerando como referencia el factor sectorial de 273 kg CO_2e/m^3 para el hormigón y una cuantía media de armadura del caso de estudio próxima a 155 kg/m^3, el factor del acero *As-built* de 0,4131 kg CO_2e/kg supone aproximadamente 64 kg CO_2e/m^3 adicionales. La contribución conjunta de hormigón y acero se sitúa, por tanto, en torno a 337 kg CO_2e/m^3.

Esta comprobación se utiliza únicamente para verificar que los resultados se sitúan en un orden de magnitud razonable y no sustituye al inventario *As-built*, que incorpora las cantidades, factores, transportes y consumos efectivamente considerados en el caso de estudio.

4.2.8. Huella (A1-A5) e intensidad por panel. Consolidación final del inventario

La hoja 07_CONSOLIDADO PANEL calcula automáticamente y reúne para cada panel la geometría, cantidades, emisiones A1-A3, A4 y A5, huella A1-A5, desviaciones, intensidades y variables de maquinaria entre otros datos.

El inventario resultante constituye la base de datos que se emplea en el capítulo 5 y en los análisis de Inteligencia Artificial.

La hoja se puede consultar en el anexo 1.

4.3. Aplicación HUELLA: funcionamiento del prototipo

El software prototipo desarrollado específicamente para este trabajo se ha denominado HUELLA.

La aplicación se ha programado en Python y utiliza Streamlit como interfaz. Con su empleo se facilita la gestión del inventario real de obra, su trazabilidad y la conversión de los resultados en información útil para el seguimiento de la ejecución.

La herramienta creada, inicialmente se configura para pantallas de hormigón, pudiéndose adaptar posteriormente a cualquier otra tipología constructiva como pilotes, pilares, muros, o losas. Resultando de esta forma una aplicación integral para la obra.

La aplicación permite trabajar a escala individual de panel y posteriormente mostrar los resultados individuales o de todo el conjunto.

Se muestra la ruta de trabajo:

Proyecto → Unidad de obra → Inventario A1-A5 → Cálculo → Resultados → IA → Optimización → Validación e informes

4.3.1. Pantalla de inicio

El usuario en la pantalla de inicio podrá crear un nuevo proyecto o abrir uno existente. En el caso de que existan varios proyectos creados, aparece una referencia directa a los mismos para poder elegir con cual se quiere trabajar.

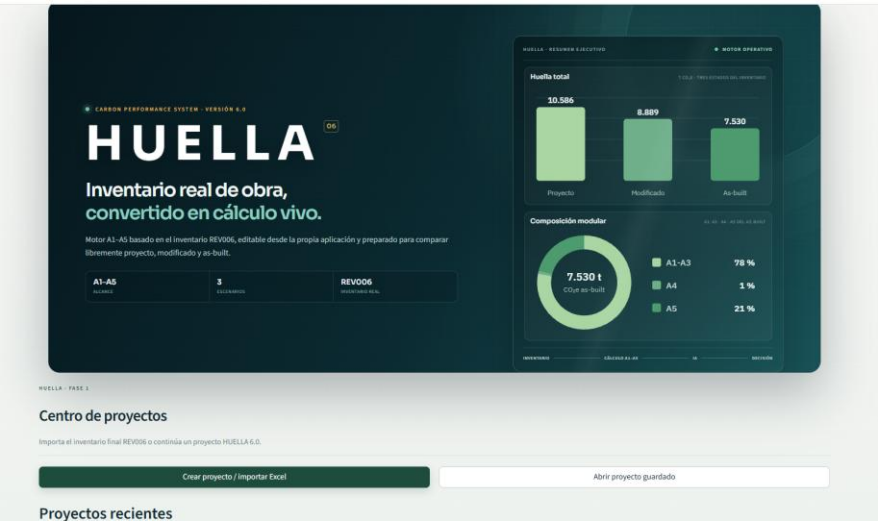

Figura 1. Vista de la pantalla de bienvenida a la aplicación HUELLA. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

4.3.2. Pantalla de selección de unidad de estudio

Una vez abierto el proyecto, en esta pantalla el usuario selecciona la unidad de trabajo.

Para este trabajo la única opción habilitada es la de pantallas de hormigón al ser la unidad de obra de la que se disponen datos completos de ejecución. HUELLA está diseñada para poder realizar el seguimiento y análisis de cualquiera de las principales unidades de obra civil.



Figura 2. Pantalla de selección de unidad de obra. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

4.3.3. Inventario y motor de cálculo A1-A5

El inventario constituye el núcleo de HUELLA. La información se organiza en tablas de paneles, materiales, transportes A4, ejecución A5, asignaciones y factores de emisión. El usuario puede revisar y editar estos registros desde la propia aplicación, sin necesidad de emplear hojas de cálculo externas. Cada dato introducido conserva su relación con el panel al que corresponde, lo que permite mantener el análisis a nivel de elemento constructivo.

HUELLA permite que la introducción de los datos de obra pueda realizarse en formato de ficha o de tabla. El usuario toma la decisión de que formato de registro le resulta más cómodo.

Las pestañas del inventario son las definidas en la metodología.

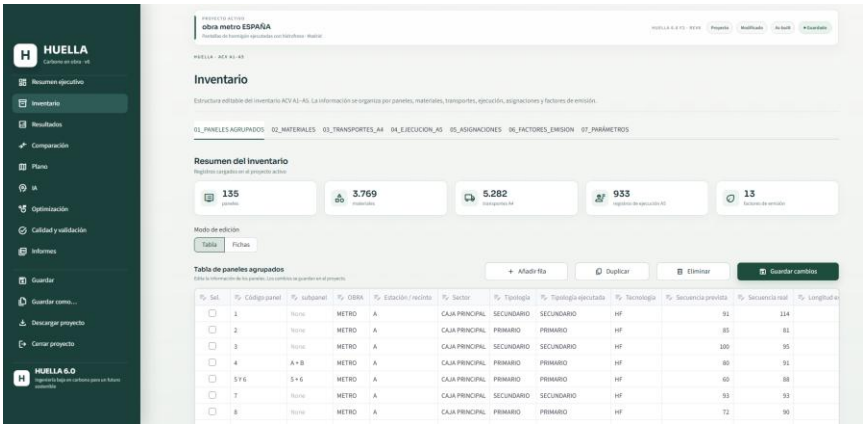

Figura 3. Vista en formato tabla del inventario de HUELLA. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

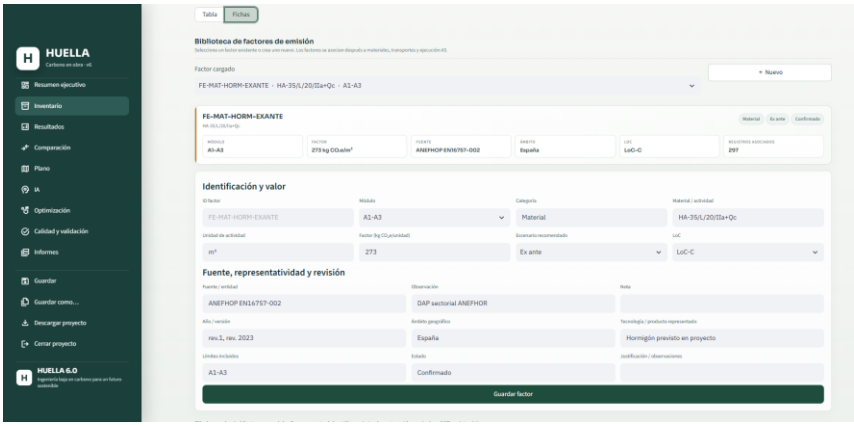

Figura 4. Vista del inventario de HUELLA, en formato ficha. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

A partir del inventario introducido, el motor de cálculo genera automáticamente las emisiones de los módulos A1-A3, A4 y A5 al nivel de pantalla individual y general de los tres escenarios del inventario.

4.3.4. Resumen ejecutivo y consulta de resultados

El Resumen ejecutivo ofrece una lectura rápida del conjunto de la obra de pantallas y de sus resultados. Presenta la huella total de los tres escenarios, sus diferencias relativas y la intensidad de carbono del escenario *As-built*. La misma vista muestra varios gráficos que facilitan la compresión de los resultados, además, se facilita el acceso a consultar la información de cualquier pantalla de la obra y un resumen de sus resultados.

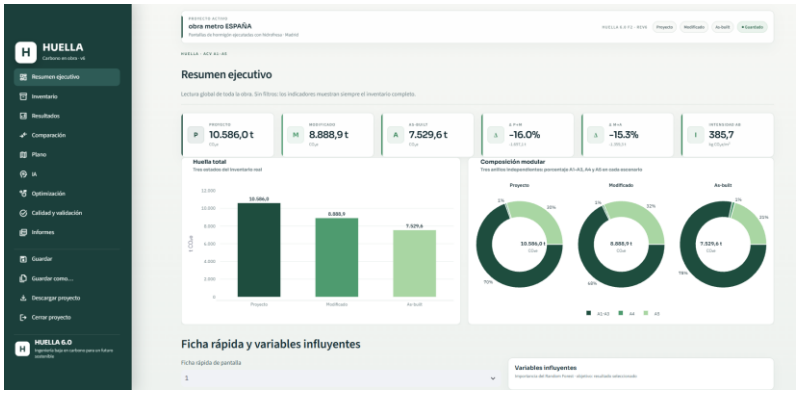

Figura 5. Resumen ejecutivo, vista 1. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

También incluye dos gráficos con el top 10 de pantallas que más y menos emisiones de carbono aportan a la obra.

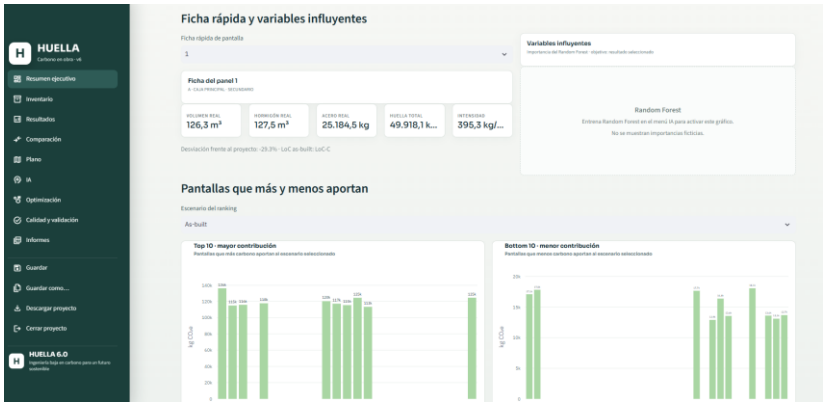

Figura 6. Resumen ejecutivo, vista 2. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

En el módulo de resultados se muestran los principales resultados de emisiones e intensidad entre otros datos. Algunos de los gráficos que

muestra del escenario *As-built* son: composición modular, peso de los materiales, transporte, actividad por equipos y distribución de intensidad.

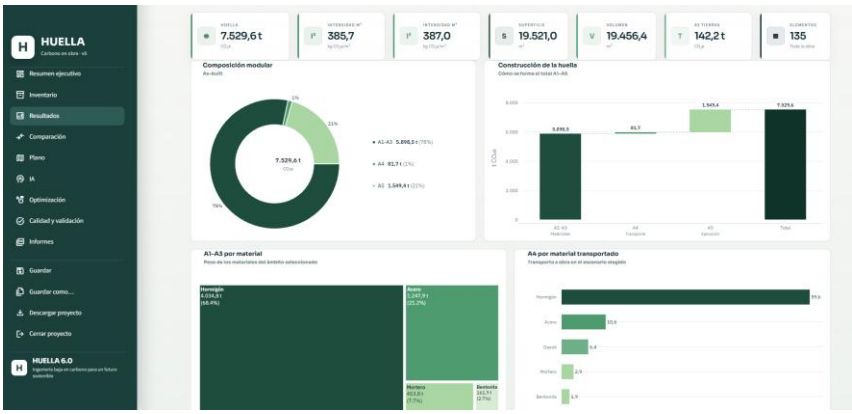

Figura 7. Resultados, vista parcial 1. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

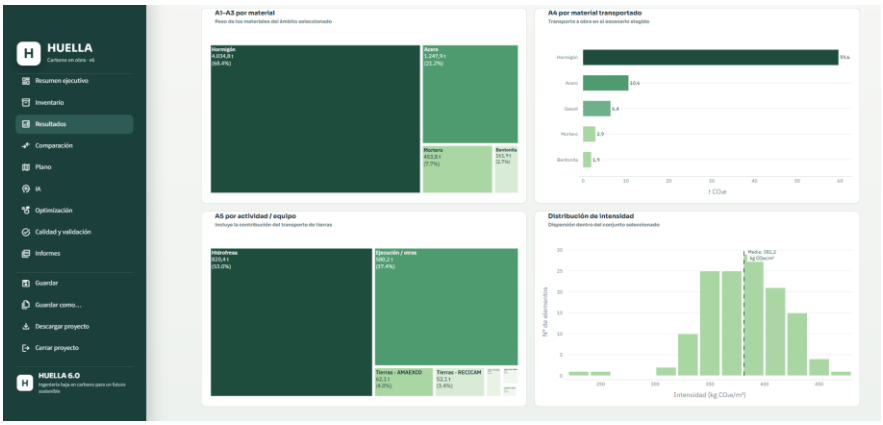

Figura 8. Resultados, vista 2. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

4.3.5. Módulo comparación

El módulo Comparación, es una herramienta integrada en la aplicación que posibilita comparar en cualquiera de los escenarios (Proyecto, Modificado, *As-built*) los resultados obtenidos en los distintos bloques del ACV (Todo A1-

A5, A1-A3, A4, A5) para la pantalla seleccionada, un conjunto de pantallas o directamente toda la obra.

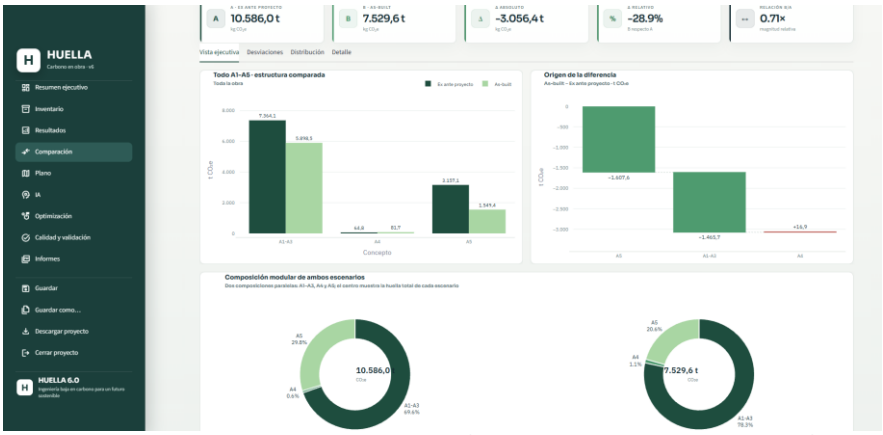

Figura 9. Aspecto general del módulo Comparación. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

4.3.6. Análisis espacial mediante plano DXF

En una obra civil es de espacial importancia la georreferenciación espacial de cada elemento a ejecutar/ejecutado. Por ello, se ha creado un módulo llamado Plano. Permite importar un plano de tamaño máximo de 200 megas en formato DXF (Drawing Exchange Format) que es el estándar internacional para el intercambio de planos. A su vez, asocia la geometría de las pantallas con los códigos del inventario. Como extra, se ha incorporado la posibilidad de importar un segundo DXF con la cartografía. De esta forma, por debajo del plano de pantallas se muestra una cartografía, con la finalidad de aportar contexto. La aplicación detecta capas, regiones e identificadores y muestra el porcentaje de asociación conseguido. Una vez realizada la correspondencia, los resultados dejan de consultarse únicamente en tablas: pueden representarse directamente sobre la planta de la obra.

Sobre el plano, con solo pasar el cursor sobre cada pantalla se muestran los principales resultados de esta y se pueden seleccionar con un clic. Además, si

el usuario selecciona una pantalla, le muestra cual es sobre el plano, facilitando rápidamente su ubicación. Este módulo presenta un gran número de posibilidades de selección y muestra la información en pantalla. Se han creado cuatro familias de análisis disponibles para representar sobre el plano dependiendo de la selección que se realice. Siendo las siguientes:

- Carbono.
- Desviación.
- Calidad.
- Inteligencia artificial.

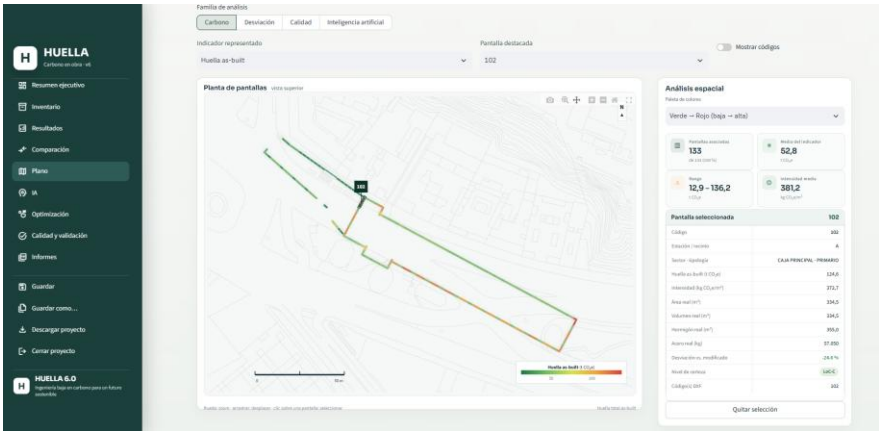

Figura 10. Integración del plano DXF con el inventario. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

4.3.7. Módulo de inteligencia artificial

La inteligencia artificial se incorpora como un análisis posterior al cálculo del ACV. No modifica los factores de emisión ni sustituye los datos reales. La aplicación HUELLA emplea los tres algoritmos comentados en el trabajo. Isolation Forest trabaja sobre las pantallas ejecutadas y señala comportamientos atípicos que conviene revisar ayudando a identificar pantallas que deben revisarse por salirse de los valores grupales. K-Means

agrupa automáticamente las pantallas que presentan patrones semejantes y selecciona el número de grupos mediante el coeficiente de silueta. Random Forest es un modelo que se entrena con las variables de un grupo de pantallas ejecutas y que a partir del entrenamiento es capaz de predecir valores de emisión de fututas pantallas.

En las predicciones estudiadas a través de Random Forest, se realizan tres grupos de análisis.

- Un modelo global con todas las pantallas. Caja principal y caja norte.
- Un modelo independiente por caja.
- Una prueba, en la que se entrena el modelo con las pantallas ejecutadas de caja principal y se intenta predecir los resultados de las pantallas de caja norte.

Todos los casos siguen el mismo procedimiento. Del grupo de pantallas ejecutadas que se emplean para entrenar el modelo, se reserva un pequeño grupo (aprox. 20%). Este grupo no participa en el entrenamiento inicial y sirven para medir la calidad sobre estas pantallas no vistas. Una vez validado el modelo, se reentrena con toda la población seleccionada de pantallas ejecutadas, aplicándose sobre el resto de las pantallas ejecutadas y que no participaron en el entrenamiento. De esta forma se pueden comprobar los resultados predichos frente a los resultados reales de la ejecución.

De este modelo se obtienen las métricas R^2, MAE, RMSE y MAPE, sobre el grado de precisión del modelo entrenado. Después de esta comprobación, el modelo final se vuelve a entrenar con el conjunto de pantallas candidatas. El usuario puede dejar por defecto que la aplicación seleccione el conjunto de pantallas que entrenarán al modelo o seleccionar manualmente las pantallas

que interesen. Seguidamente, SHAP se utiliza para explicar el peso de cada variable en las predicciones del Random Forest. Su función es interpretativa ya que ayuda a comprender el modelo y a localizar posibles palancas de actuación, sin demostrar causalidad ni calcular por sí mismo un ahorro de emisiones.



Figura 11. Módulo de inteligencia artificial. Ejemplo de resultados de K-Means. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

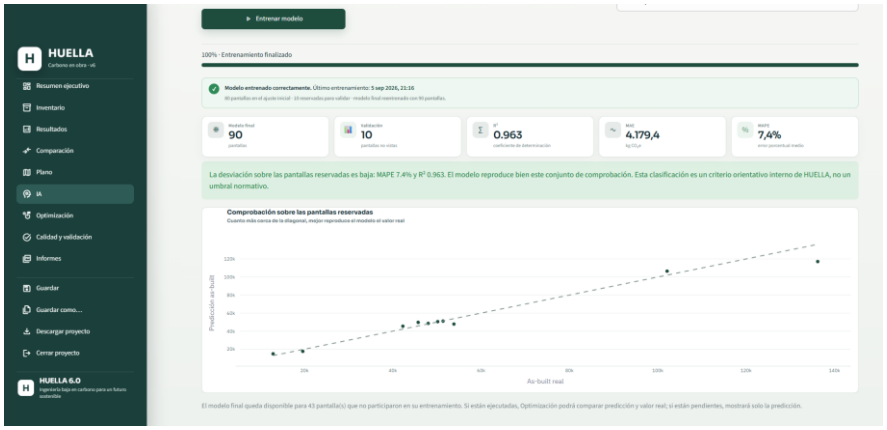

Figura 12. Módulo de inteligencia artificial, pantalla de modelo entrenado con Random Forest. Ejemplo de resultados de K-Means. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

4.3.8. Optimización y apoyo a la toma de decisiones

El módulo de Optimización transforma el diagnóstico anterior en un entorno de ensayo, disponiendo de los siguientes niveles:

- Simulación manual: el usuario modifica hipótesis sencillas sobre materiales, distancias de transporte o consumo de combustible. La aplicación HUELLA recalcula de forma inmediata los nuevos resultados de emisiones e intensidad para facilitar la toma de decisiones de obra.
- Simulación automática: se activa cuando existe un Random Forest entrenado. La aplicación incorpora las predicciones y la explicación SHAP para ordenar las variables que más pesan en cada caso y orientar medidas de reducción. A su vez, propone al usuario medidas de decisión a tomar y el porcentaje de reducción que implicaría su ejecución. El usuario es el que toma la decisión final ayudado por la IA.

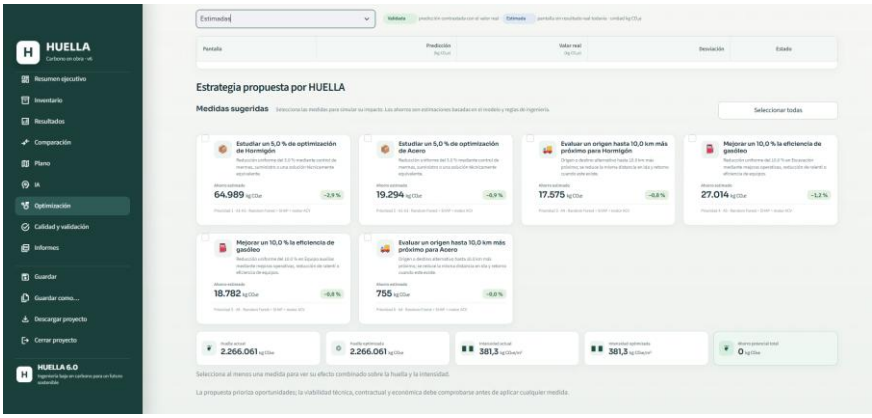

Figura 13. Módulo de Optimización. Predicción, explicación SHAP y simulación de medidas de reducción sobre una pantalla seleccionada. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

4.3.9. Calidad, trazabilidad y exportación

Antes de considerar válidos los resultados, HUELLA incorpora un bloque específico de Calidad y validación. Dentro del mismo pueden consultarse las incidencias detectadas en el inventario, la revisión de factores de emisión, la trazabilidad mediante Nivel de Certeza (LoC) y la validación del modelo Random Forest, de esta forma, el usuario tendrá la capacidad de diferenciar resultados estimados de resultados calculados y documentados.

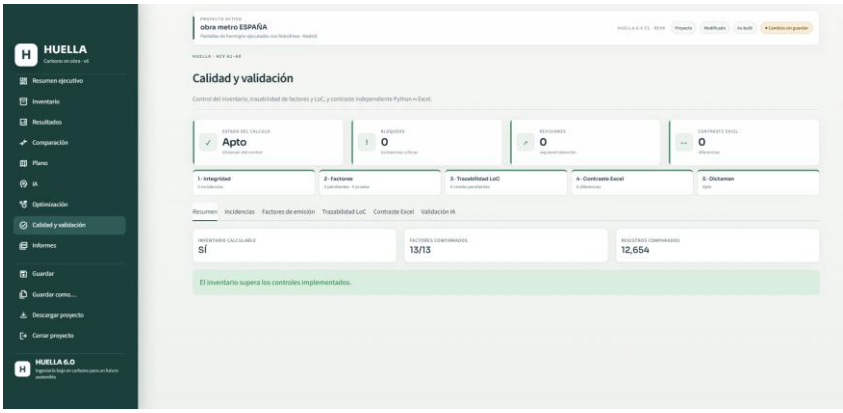

Figura 14. Vista del módulo de Calidad. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

La aplicación permite guardar el proyecto en un archivo propio con la extensión. acvproj y generar entregables en formato CSV y EXCEL. También exporta los archivos de validación y predicciones de Random Forest, siempre que se haya entrenado un modelo con los datos ejecutados.

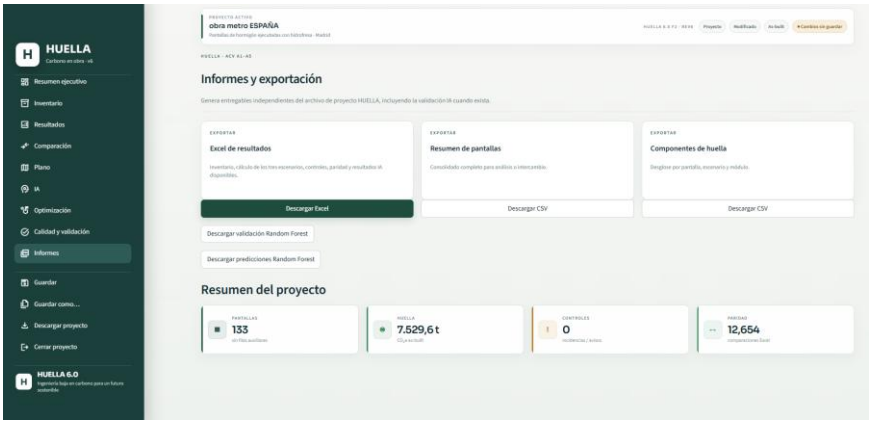

Figura 15. Vista del módulo de Calidad. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

4.3.10. Finalidad de HUELLA

HUELLA reúne en un mismo entorno el inventario, el cálculo A1-A5, la comparación entre escenarios, el análisis espacial, las herramientas de IA y la simulación de alternativas para el caso de estudio. Su utilidad se plantea como apoyo al registro y a la interpretación. Su finalidad es:

- Facilitar el registro del inventario y su trazabilidad.
- Calcular las emisiones de forma sencilla.
- Comparar los escenarios, fases de emisiones, en la unidad o grupo de unidades seleccionadas.
- Crear en un único entorno la relación espacial entre elementos de obra y sus emisiones.
- Entregar los principales cálculos relacionados.
- Aportar un extra con la integración de varias capas de IA que analizan los resultados y facilitan su interpretación y la toma de decisiones.

Todo ello bajo una experiencia de usuario fácil, intuitiva y rápida, entregando los resultados de forma visualmente atractiva.

4.3.11. Detalles técnicos de HUELLA

HUELLA se ha desarrollado íntegramente en Python, utilizando Streamlit para construir la interfaz gráfica y organizar la interacción con el usuario. De esta forma la gestión de datos, los cálculos del ACV, la representación gráfica y los algoritmos de IA están integrados en un mismo entorno. La extensión del código es de más de 12.000 líneas, distribuidas en diferentes módulos, cada uno con su función. Esta arquitectura modular facilita el mantenimiento del programa y sus ampliaciones.

La información se almacena en ficheros propios con extensión *.acvproj, implementados mediante una base de datos SQLite. Cada proyecto con sus datos (todo el inventario) y su configuración se almacena en ellos. Un fichero por proyecto.

El núcleo de cálculo se encuentra en un motor ACV desarrollado en Python. Este motor reproduce las reglas del inventario para los módulos A1-A5 y recalcula automáticamente todas las variables.

Las librerías Pandas y NumPy han sido las empleadas para el tratamiento de la información. La capa de inteligencia artificial se ha desarrollado mediante scikit-learn y SHAP, con módulos independientes para Isolation Forest, K-Means y Random Forest. Las representaciones gráficas de los resultados se generan principalmente mediante Plotly.

HUELLA incorpora además un módulo específico para información gráfica en formato DXF, desarrollado mediante la librería ezdxf. La arquitectura admite asimismo un segundo DXF como cartografía de contexto. Ambos planos y ficheros son independientes, aunque en la aplicación se ven como uno solo.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. Cuantificación de emisiones

Tomando la secuencia definida en la metodología de cálculo, los resultados se presentan siguiendo las fórmulas y reglas de asignación ya descritas en el apartado 3.4.

Los resultados calculados corresponden a una huella parcial A1-A5, no a toda la estación y se obtienen del inventario y de la aplicación HUELLA.

5.1.1. Unidades, recintos e intensidades

La obra está organizada en dos sectores que se han explicado en el apartado 4.2.24.2.2 4.2.2, siendo sus huellas medias:

- Caja principal: 68,48 t CO_2e/ panel
- Caja norte: 31,69 t CO_2e/ panel

Tabla 34. Caracterización de los recintos. (Elaboración propia)

Magnitud	Caja principal	Caja norte	Total
Códigos analizados	100	33	133
Profundidad media (m)	44,91	18,85	38,44
Huella total (t CO_2e)	6.848,18	1.045,63	7.893,81
Huella media (t CO_2e/panel)	68,48	31,69	59,35
Huella mediana (t CO_2e/panel)	54,13	22,81	53,06
Intensidad media (kg CO_2e/m^3)	411,99	403,84	409,97
Intensidad mediana (kg CO_2e/m^3)	413,47	396,27	411,96

Los 133 códigos de paneles acumulan 7.893,81 t CO_2e en el escenario *As-built*. El código GENERAL aporta 22,92 t y REPERFORACIONES no añade emisiones reales en este escenario ya que están repartidas en sus paneles. La suma total con la cantidad no asignada en general es de **7.916,73 t**.

La intensidad global de los 133 paneles es de 405,72 kg CO_2e/m^3, obtenida al dividir la huella total acumulada entre el volumen total ejecutado, por lo que

difiere ligeramente de la media aritmética de las intensidades individuales de cada panel.

En la siguiente tabla se pueden ver los paneles con mayor / menor huella e intensidad de cada recinto.

Tabla 35. Paneles con mayor y menor huella e intensidad *As-built*. (Elaboración propia)

Recinto	Criterio	Panel	Emisiones *As-built* (t CO_2e)	Intensidad del panel (kg CO_2e/m^3)	Huella media del recinto (t CO_2e/panel)
Caja principal	Mayor huella	58	171,83	411,96	68,48
	Menor huella	96	43,95	352,50	
	Mayor intensidad	11	63,85	506,30	
	Menor intensidad	100	131,10	348,05	
Caja norte	Mayor huella	113	91,28	408,17	31,69
	Menor huella	126	13,70	424,31	
	Mayor intensidad	127	17,64	545,99	
	Menor intensidad	109	57,76	329,13	

5.1.2. Materiales y origen de la desviación A1-A3

El hormigón representa 4.034,84 t CO_2e y el acero 1.247,94 t CO_2e. Conjuntamente suponen el 66,73 % de la huella total *As-built*. El mortero aporta 453,79 t CO_2e y la bentonita 161,89 t CO_2e.

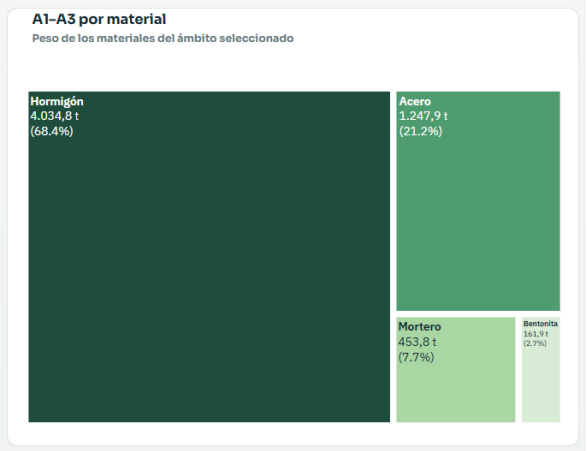

Figura 16. Peso materiales *As-built*. (Elaboración propia a partir de HUELLA)

La siguiente tabla muestra las cantidades de los materiales *As-built* y sus emisiones:

Tabla 36. Materiales del *As-built*: cantidades y emisiones. (Elaboración propia)

Material	**Cantidad y unidad**	**Emisiones (t CO_2e)**	**Peso en A1-A5 (%)**
Hormigón	18.550,50 m^3	4.034,84	50,97
Acero	3.020.920,29 kg	1.247,94	15,76
Mortero	1.392,00 m^3	453,79	5,73
Bentonita	326.400,00 kg	161,89	2,04
Total A1-A3	—	**5.898,47**	**74,51**

Del hormigón suministrado 4.448,5 m^3 utilizan el factor de emisión 273 kg CO_2e/m^3 y 14.102 m^3 utilizan 200 kg CO_2e/m^3. La cantidad finalmente incorporada es 18.228 m^3.

Los 263 m^3 de hormigón rechazado y los 59,5 m^3 sobrantes representan conjuntamente 322,5 m^3 de material fabricado que no se incorpora finalmente a las pantallas. Aplicando el factor de emisión correspondiente de 200 kg CO_2e/m^3 estos volúmenes generan 64,5 t CO_2e de emisiones A1-A3, equivalentes a una intensidad de 3,32 kg CO_2e/m^3 respecto al volumen *As-built* del conjunto. Estas emisiones se mantienen en el inventario porque la

carga ambiental de fabricación ya se ha producido independientemente de que el hormigón se incorpore o no al elemento final.

El mortero empleado en el relleno de las reperforaciones tiene un volumen total de 1.392 m³ que generan 453,79 t CO_2e de emisiones A1-A3. Esto representa aproximadamente el 5,73 % de la huella total *As-built* y una contribución de 23,32 kg CO_2e/m³ a la intensidad del conjunto.

La disminución de A1-A3 frente a Modificado es de 116,73 t CO_2e, pero no se debe a que todos los consumos disminuyan. El hormigón previsto en la Tabla 21 de materiales pasa de 17.573,12 a 18.550,50 m³, el acero de 2.519.483,22 a 3.020.920,29 kg y la bentonita de 52.467,87 a 326.400,00 kg.

El empleo en el escenario *As-built* de un factor de emisión del hormigón de 200 kg CO_2e/m³ para 14.102 m³ frente a los 273 kg CO_2e/m³ considerados en el Modificado, reduce el resultado calculado en 1.029,45 t CO_2e. Esta diferencia se atribuye al cambio del factor de emisión adoptado y debe interpretarse de acuerdo con la representatividad de la fuente empleada.

5.1.3. Emisiones A4

El módulo A4 presenta las siguientes emisiones:

Tabla 37. Emisiones e intensidad del módulo A4 por escenario. (Elaboración propia)

Escenario	Volumen (m³)	Emisiones A4 (t CO_2e)	Intensidad A4 (kg CO_2e/m³)
Proyecto	22.186,65	80,07	3,61
Modificado	17.489,29	72,93	4,17
As-built	19.456,36	93,06	4,78

En el escenario *As-built* A4 representa únicamente el 1,18 % de la huella total por lo que su peso relativo es reducido frente a los módulos A1-A3 y A5.

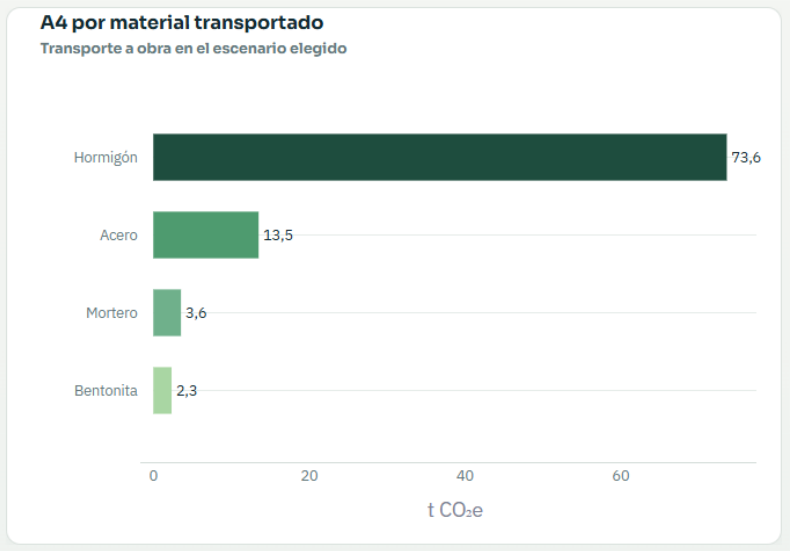

Figura 17. Transportes asociados por materiales

En el escenario *As-built* el transporte del hormigón es la principal fuente del módulo A4 con 73,6 t CO_2e que son aproximadamente el 79 % de las 93,06 t CO_2e generadas por el transporte de materiales hasta la obra.

5.1.4. Emisiones A5

Las principales emisiones de A5 las produce la hidrofresa que aporta 756,60 t CO_2e (incluyendo perforación y reperforación) y los equipos de lodos que aportan 697,66 t CO_2e.

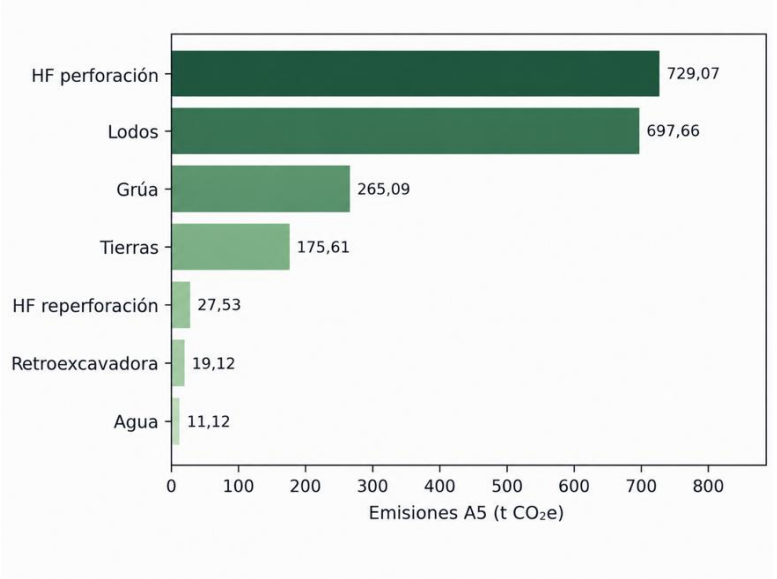

Figura 18. Contribuciones de ejecución con emisiones positivas. (Elaboración propia)

En la siguiente tabla se muestran las emisiones de las actividades en los distintos escenarios junto con el peso que tiene la actividad en el *As-built*.

Tabla 38. Comparativa del desglose del módulo A5 por escenario. (Elaboración propia)

Actividad	**Proyecto (t CO_2e)**	**Modificado (t CO_2e)**	***As-built*** **(t CO_2e)**	**Peso en A5** ***As-built*** **(%)**
HF perforación	1.738,48	1.861,77	729,07	37,87
HF reperforación	0,00	35,23	27,53	1,43
Grúa	318,03	472,98	265,09	13,77
Lodos	1.711,50	1.008,71	697,66	36,24
Retroexcavadora	25,24	20,94	19,12	0,99
Agua	11,47	9,04	11,12	0,58
Tierras	106,82	77,45	175,61	9,12
Electricidad	0,00	0,00	0,00	0,00
Total A5	**3.911,54**	**3.486,12**	**1.925,20**	**100,00**

Los consumos *As-built* de gasóleo imputados o estimados a la maquinaria ascienden a 528.652,59 L que corresponden a la hidrofresa, grúa, equipos de lodos y retroexcavadora. Aplicando un factor de emisión de 3,2885 kg CO_2e/L estos consumos generan 1.738,47 t CO_2e. Al añadir las emisiones asociadas al

agua (11,12 t CO_2e) y al transporte de tierras (175,61 t CO_2e) el módulo A5 alcanza un total de 1.925,20 t CO_2e.

Los 21.500,00 m^3 de agua producen 11,1155 t CO_2e con el factor integral 0,517 kg CO_2e/m^3.

La interpretación de la reducción de A5 respecto al escenario Modificado debe considerar las hipótesis *Ex ante* empleadas para estimar horas y consumos, así como los criterios de asignación utilizados en el *As-built*. Los datos permiten cuantificar las diferencias entre escenarios, pero no determinar por sí solos qué parte responde a una reducción de esperas, a un mayor rendimiento de excavación, a las condiciones geotécnicas o a una organización más eficiente de la obra. Para atribuir la diferencia a estas causas es necesario disponer de partes de ejecución comparables y de una definición homogénea de la actividad analizada.

5.1.5. Calidad del dato

La siguiente tabla compara la distribución ponderada de las emisiones según el Nivel de Certeza (LoC) en los tres escenarios analizados. Los porcentajes se calculan sobre la huella total de cada escenario y representan el peso de las emisiones asociado a cada nivel de certeza.

Tabla 39. Distribución de los Niveles de Certeza por escenario. (Elaboración propia)

Escenario	Huella A1-A5 (t CO_2e)	LoC-A (%)	LoC-B (%)	LoC-C (%)	LoC global
Proyecto	11.355,74	0,00	0,00	100,00	LoC-C
Modificado	9.574,25	0,00	0,00	100,00	LoC-C
As-built	7.916,73	0,00	51,39	48,61	LoC-C

La distribución ponderada *As-built* queda del siguiente modo:

Tabla 40. Calidad del escenario *As-built*.

Nivel de certeza	Emisiones (t CO_2e)	Peso sobre la huella *As-built* (%)	Interpretación
LoC-A	0,00	0,00	Dato primario, específico y directamente documentado. No existen emisiones finales clasificadas en este nivel.
LoC-B	4.068,34	51,39	Resultado documentado, pero con algún factor, reparto o dato indirecto que limita su nivel de certeza.
LoC-C	3.848,39	48,61	Resultado que incorpora datos genéricos, estimaciones o factores de menor especificidad.
Total	**7.916,73**	**100,00**	**Huella total del escenario *As-built* considerada en esta distribución.**

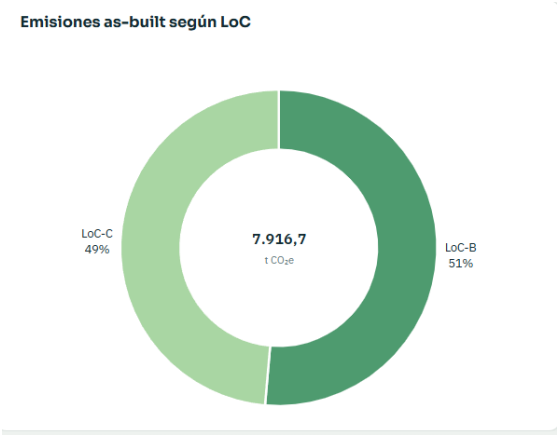

Figura 19. Peso del LoC en el escenario *As-built*. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

La distribución obtenida muestra que el 51,39 % de la huella *As-built* corresponde a resultados LoC-B y el 48,61 % a resultados LoC-C.

5.1.6. Huella (A1-A5) y comparación de escenarios

El inventario obtiene 11.355,74 t CO_2e en Proyecto, 9.574,25 t CO_2e en Modificado y 7.916,73 t CO_2e en *As-built*.

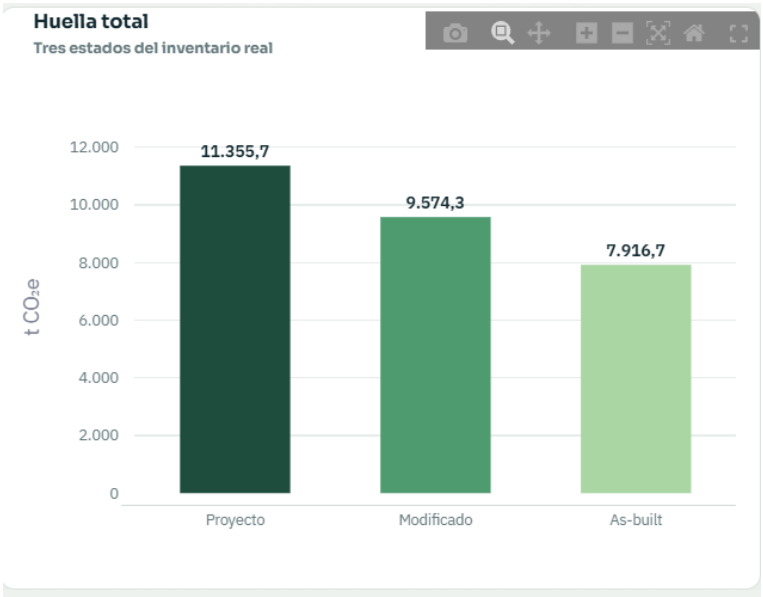

Figura 20. Huella de los tres escenarios con escala común. (Elaboración propia a partir de HUELLA)

El cambio del Proyecto al Modificado reduce la huella 1.781,49 t CO_2e y la diferencia entre Modificado y *As-built* la reduce 1.657,52 t CO_2e.

Tabla 41. Huella A1-A5 y cambios consecutivos en t CO_2e. (Elaboración propia)

Escenario	Huella (t CO_2e)	Cambio (t CO_2e)	Cambio (%)
Proyecto	11.355,74	—	—
Modificado	9.574,25	−1.781,49	−15,69
As-built	7.916,73	−1.657,52	−17,31

La diferencia entre Proyecto - *As-built* es de −3.439,01 t CO_2e que equivale al −30,28 %. Este porcentaje no representa automáticamente un ahorro atribuible a la ejecución ya que entre escenarios cambian cantidades, factores de emisiones y cobertura de algunas actividades.

Tabla 42. Intensidad A1-A5 y cambios consecutivos kg CO_2e/m³. (Elaboración propia)

Escenario	Intensidad (kg CO_2e/m³)	Cambio (kg CO_2e/m³)	Cambio (%)
Proyecto	511,83	—	—
Modificado	547,44	+35,61	+6,96 %

Escenario	Intensidad ($kg\ CO_2e/m^3$)	Cambio ($kg\ CO_2e/m^3$)	Cambio (%)
As-built	406,90	−140,54	−25,67 %

5.1.6.1. Contribución de los módulos

A1-A3 concentra 5.898,47 t CO_2e, el 74,51 % del *As-built*. A5 aporta 1.925,20 t CO_2e, el 24,32 %, y A4, 93,06 t CO_2e, el 1,18 %.

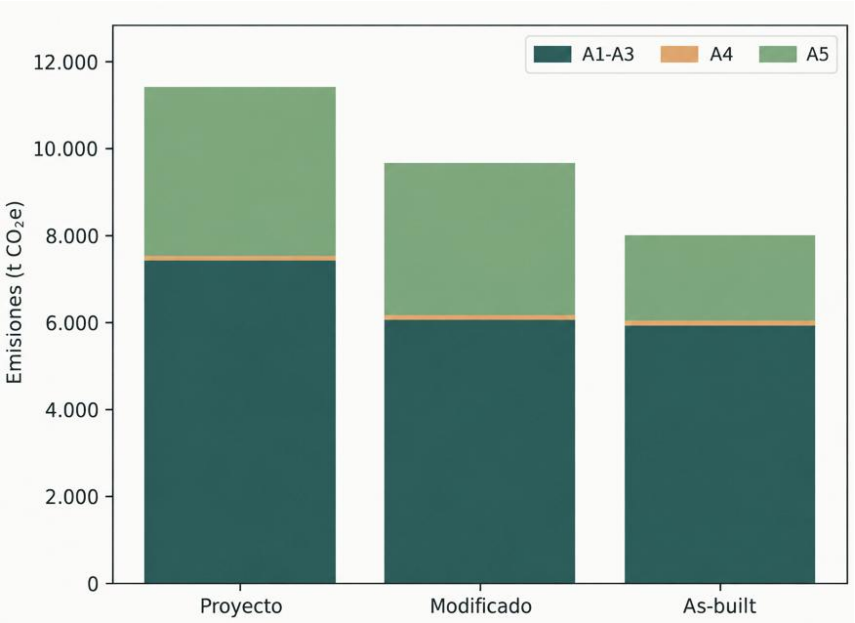

Figura 21. Composición modular de los escenarios. (Elaboración propia)

Aunque los materiales concentran la mayor parte de las emisiones, las diferencias observadas en la fase de ejecución siguen siendo relevantes, especialmente al comparar el escenario *As-built* con el Modificado.

Tabla 43. Emisiones por módulo y escenario. (Elaboración propia)

Módulo	Proyecto (t CO_2e)	Modificado (t CO_2e)	*As-built* (t CO_2e)
A1-A3	7.364,13	6.015,20	5.898,47
A4	80,07	72,93	93,06
A5	3.911,54	3.486,12	1.925,20
Total	**11.355,74**	**9.574,25**	**7.916,73**

Entre los escenarios Proyecto y *As-built*, las emisiones de A1-A3 disminuyen en 1.465,66 t CO_2e (−19,90 %) y las de A5 en 1.986,34 t CO_2e (−50,78 %). Por el contrario, A4 aumenta en 12,99 t CO_2e (+16,22 %). La misma tendencia se observa en el escenario Modificado, en el cual A4 aumenta un 27,59 % mientras que A5 disminuye un 44,78 %. Por tanto, la evolución del módulo A4 debe analizarse de forma independiente, ya que su comportamiento no sigue necesariamente la tendencia de la huella total A1-A5.

Los 93 viajes de entrega de gasóleo conservan 7,904 t CO_2e brutas informativas, excluidas de la suma aditiva por el criterio WTW. Los viajes de tierras aportan 175,61 t CO_2e en A5.3 y están contabilizados en A5. Estas dos convenciones explican por qué sumar indiscriminadamente todos los desgloses visibles generaría doble contabilización.

Se muestra a continuación la composición modular de los escenarios:

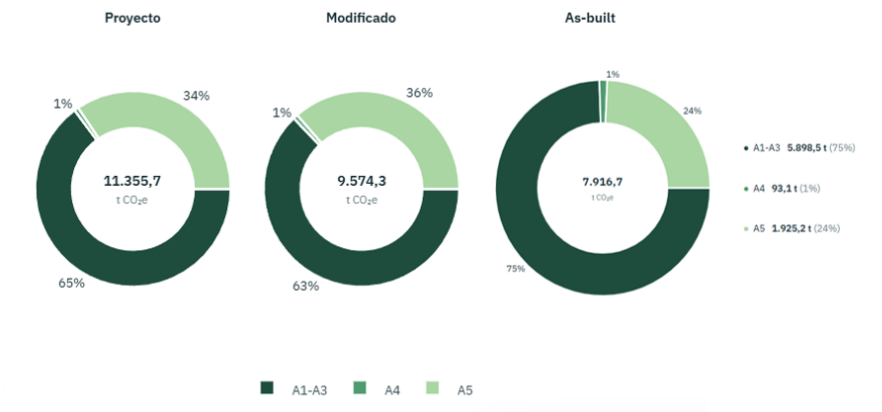

Figura 22. Composición modular de los escenarios y emisiones *As-built*. (Elaboración propia a partir de HUELLA)

5.1.6.2. Resumen global A1-A5 y Nivel de Certeza

En la siguiente tabla se muestra un resumen global de los datos más relevantes y los niveles de certeza:

Tabla 44. Resumen global A1-A5 y Nivel de Certeza de la hoja 07_CONSOLIDADO. (Elaboración propia)

Indicador	Ex ante Proyecto	Ex ante Modificado	As-built
A1-A3 (kg CO_2e)	7.364.129	6.015.201	5.898.469
A4 (kg CO_2e)	80.066	72.932	93.056
A5 (kg CO_2e)	3.911.545	3.486.117	1.925.204
Total asignado a paneles A1-A5 (kg CO_2e)	11.355.739	9.574.250	7.916.729
Superficie total (m^2)	18.905,13	17.603,29	19.521,03
Volumen total (m^3)	22.186,65	17.489,29	19.456,36
Intensidad global (kg CO_2e/m^2)	600,670	543,890	405,549
Intensidad global (kg CO_2e/m^3)	511,828	547,435	406,897
LoC global (paneles)	LoC-C	LoC-C	LoC-C
% LoC-A	0,00%	0,00%	0,00%
% LoC-B	0,00%	0,00%	51,39%
% LoC-C	100,00%	100,00%	48,61%

5.2. Resultado de IA

En este apartado se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación al caso de estudio del módulo de inteligencia artificial integrado en la aplicación HUELLA. Este módulo combina tres técnicas con funciones diferentes Isolation Forest, K-Means y Random Forest, cuya metodología y criterios de aplicación se han descrito previamente en el apartado 3.5 de metodología.

La combinación de estas técnicas amplía la capacidad de análisis de los resultados y constituye una herramienta complementaria de apoyo en la

toma de decisiones, tanto durante la ejecución de la obra como en su evaluación posterior.

Los tres métodos se ejecutan directamente en la aplicación HUELLA sobre las pantallas ejecutadas, utilizando la librería de código abierto de Python scikit-learn.

- Isolation Forest y K-Means utilizan ocho variables reales de cada pantalla: superficie, volumen geométrico, hormigón suministrado, acero, bentonita, emisiones A4, horas de hidrofresa e incidencias registradas.
- Random Forest se entrena utilizando como variable objetivo la huella de carbono *As-built* de las pantallas ya ejecutadas y como variables de entrada, siete magnitudes conocidas antes de la ejecución: superficie, volumen teórico, hormigón previsto, acero previsto y emisiones *Ex ante* de los módulos A1-A3, A4 y A5. El modelo aprende de la relación entre las características previstas y la huella real observada con el fin de estimar la huella *As-built* de las pantallas pendientes de ejecución.

5.2.1. Detección de anomalías con Isolation Forest

Isolation Forest asigna a cada una de las pantallas una puntuación de anomalía. Esta mide cuánto se separa del resto en el espacio de las ocho magnitudes. Aquellas pantallas que tienen una puntuación más alta, hasta un máximo del 10 % del conjunto, se marcan como “Revisar”. Una alerta significa comportamiento atípico, no un error demostrado. Sobre las 133 pantallas ejecutadas el método señala 3 (Figura 23 y Tabla 45).

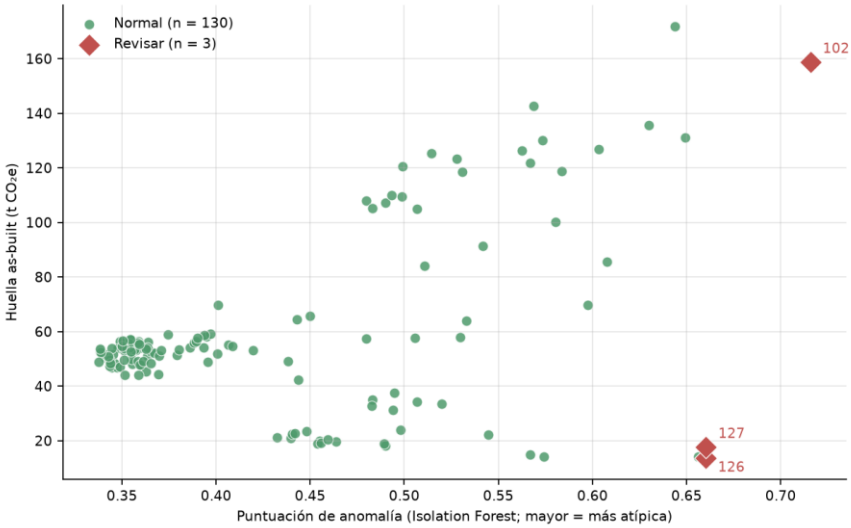

Figura 23. Puntuación de anomalía de Isolation Forest frente a huella *As-built* de las 133 pantallas ejecutadas. Señaladas en rojo las pantallas a revisar. (Elaboración propia a partir de HUELLA).

El código 102 destaca por su tamaño y por la actividad registrada: 334,46 m² de superficie y 51 horas de hidrofresa. Estas magnitudes explican que aparezca como caso extremo, pero no demuestran una ejecución ineficiente. Los códigos 126 y 127 se ejecutaron con cuchara por eso las 0 h de hidrofresa son coherentes con la tecnología utilizada.

Tabla 45. Pantallas señaladas por Isolation Forest y magnitudes que explican la alerta. Media de la obra: 138 m², 16,3 h de hidrofresa, 410 kg CO_2e/m^3. (Elaboración propia)

Pantalla	Recinto	Huella *As-built* (t CO_2e)	Superficie (m^2)	Profundidad (m)	Horas hidrofresa	Incidencias	Desviación *As-built* vs modificado
102	Caja Principal	158,8	334	47,2	51,0	0	-11,0 %
126	Caja Norte	13,7	54	19,2	0,0	1	+8,9 %
127	Caja Norte	17,6	54	19,2	0,0	1	+40,0 %

En 126 y 127 el campo de incidencias recoge una anotación relacionada con el método de excavación y la imputación a grúa, no una avería demostrada. El código 127 presenta una huella *As-built* un 40,02 % superior a su referencia Modificado y merece una revisión específica de cantidades y tiempos, pero los datos disponibles no permiten atribuir esa desviación a una causa única.

Isolation Forest se utiliza como filtro para priorizar la revisión de casos atípicos dentro del conjunto, siendo necesario contrastar la alerta con la tecnología y la documentación de obra.

Este método se emplea como filtro de casos extremos y de registros con incidencias.

5.2.2. Familias de comportamiento con K-Means

K-Means agrupa las pantallas en 2 grupos y su silueta 0,673.

Tabla 46. Caracterización de los dos grupos obtenidos con K-Means sobre las 133 pantallas ejecutadas. (Elaboración propia)

Indicador	Grupo 1 · pantallas estándar	Grupo 2 · primarias profundas
Nº de pantallas	112	21
Huella *As-built* media (t CO_2e)	47,4	123,0
Rango de huella (t CO_2e)	13,7 – 100,3	85,6 – 171,8
Superficie real media (m^2)	109	293
Profundidad real media (m)	37,2	45,3
Hormigón suministrado medio (m^3)	111	293

Indicador	Grupo 1 · pantallas estándar	Grupo 2 · primarias profundas
Acero real medio (kg)	17.857	47.530
Horas de hidrofresa medias	14,4	26,3
Intensidad *As-built* media (kg CO_2e/m^3)	413	392
Pantallas primarias	46 %	100 %
Pantallas de la caja norte	33	0
Anomalías (Isolation Forest)	2	1

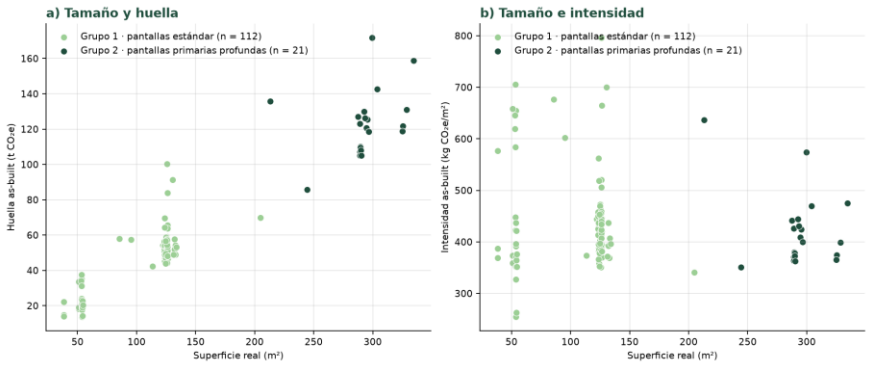

Figura 24. Grupos K-Means frente a la superficie real de cada pantalla: (a) huella *As-built* y (b) intensidad por m². (Elaboración propia a partir de HUELLA).

El resultado obtenido es relevante ya que coincide con los datos de geometría. El grupo 1 agrupa 112 pantallas restantes que tienen un tamaño estándar. Aquí se incluyen las 33 de la caja norte. El grupo 2 agrupa las 21 pantallas primarias de la caja principal de mayor superficie y profundidad. Estas consumen más del doble de hormigón y acero que el resto y concentran las huellas más altas, esto tiene sentido porque existen paneles dobles. La

intensidad media por m² de ambos grupos es prácticamente igual (437 frente a 421 kg CO_2e/m^2). Por lo tanto, se puede se puede afirmar que en la obra de estudio, la huella de una pantalla es proporcional a su tamaño y no existe una familia de pantallas sistemáticamente más o menos eficiente.

5.2.3. Predicción con Random Forest: muestras y procedimiento

La siguiente tabla muestra las particiones que se han hecho en los análisis de predicción.

Tabla 47. Particiones de pantallas utilizadas en los cuatro análisis de predicción. (Elaboración propia)

Análisis	Ámbito	Población de desarrollo	Validación reservada	Pantallas fuera del modelo
Modelo global	Ambas cajas (133 ejecutadas)	90	12	43
Caja principal	Pantallas 1–102 (100 ejecutadas)	70	14	30
Caja norte	Pantallas 103–135 (33 ejecutadas)	24	5	9
Transferencia	Entrenado en caja principal, aplicado a caja norte	86 (principal)	14 (principal)	33 (toda la caja norte)

5.2.3.1. Calidad de la predicción

La Tabla 48 muestra los indicadores de calidad de los cuatro análisis, calculados siempre frente al valor *As-built* real, tanto sobre las pantallas reservadas como sobre las pantallas fuera del modelo.

Tabla 48. Indicadores de calidad de los cuatro análisis de predicción. (Elaboración propia)

Análisis	R^2	MAE val. ($t\ CO_2e$)	MAPE val.	MAE ext. ($t\ CO_2e$)	MAPE ext.	Dentro de ±10 %	Dentro de ±20 %	Sesgo del total
Modelo global	0,859	9,2	14,6 %	6,2	11,6 %	29 de 43	34 de 43	-1,2 %
Caja principal	0,778	11,2	15,1 %	6,3	9,8 %	21 de 30	27 de 30	+5,7 %
Caja norte	0,588	12,3	28,2 %	5,8	20,8 %	3 de 9	4 de 9	+9,7 %
Transf. principal → norte	0,879	7,7	11,1 %	31,7	149,3 %	3 de 33	6 de 33	+93,9 %

R^2 (coeficiente de determinación) no mide error en toneladas sino la capacidad de explicar las diferencias que hay entre pantallas. El R^2 de 0,859 quiere decir que el modelo explica el 86 % de esa variación; el 14 % restante es lo que no consigue predecir. $R^2 = 1$ sería predicción perfecta; $R^2 = 0$ sería no hacerlo mejor que decir siempre la media.

MAE (error absoluto medio) es la desviación típica por pantalla, en toneladas. Se calcula pantalla a pantalla la diferencia entre predicción y real, se le quita el signo y se hace la media. El MAE de 6,2 t significa que, en promedio, el modelo se equivoca unas 6 t en cada pantalla

MAPE (error porcentual absoluto medio) es lo mismo, pero en porcentaje de cada pantalla: en cada una, la diferencia dividida entre el valor real, luego la media. El 11,6 % expresa que, de media, el modelo se desvía un 12 % del valor real de cada pantalla.

El **sesgo del total** es cuánto se desvía la suma de todas las predicciones respecto a la suma de los valores reales. Aquí los errores por arriba y por abajo se compensan: el modelo se pasa 8 t en una pantalla y se queda corto 7 t en

otra, y en el total casi se anulan. Por eso el sesgo es −1,2 % aunque cada pantalla individual falle un 12 %.

5.2.3.2. Random Forest en el modelo global de pantallas de estudio

El modelo global emplea 90 pantallas de desarrollo de ambas cajas, reservando 12 pantallas para evaluar. Se obtiene un R^2 de 0,859, un MAE de 9,2 t CO_2e y un MAPE del 14,6 %. Ello quiere decir que explica en torno al 86 % de la variación de la huella entre pantallas y se desvía unas 9 t de una huella media próxima a 60 t.

Sobre las 43 pantallas fuera del modelo y que están ejecutadas, el error medio baja al 11,6 %. Si se estudia pantalla a pantalla, en 29 de las 43 la predicción se queda a menos de un 10 % del valor real, en 34 a menos de un 20 % y solo en 9 el error supera el 20 % (banda sombreada de la Figura 25). A nivel de obra los errores se compensan: la suma de las 43 predicciones difiere un −1,2 % del total real.

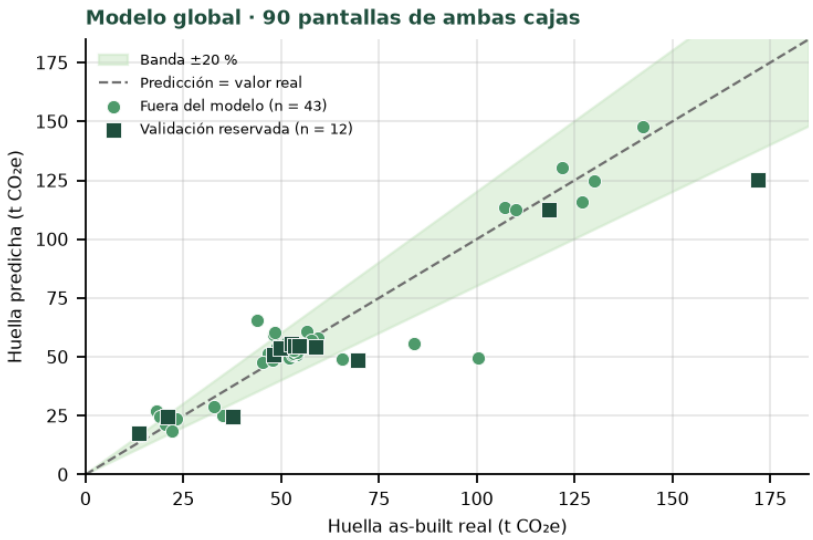

Figura 25. Huella prevista *As-built* por el modelo global frente a la huella *As-built* real en las 12 pantallas reservadas y en las 43 pantallas fuera del modelo. Banda sombreada: ±20 %. (Elaboración propia).

Los mayores errores individuales se concentran en pantallas atípicas: la pantalla 94 (huella real 100,3 t, predicha 49,7 t) y las pantallas 96 y 103, con desviaciones próximas al 50 %. En los tres casos la huella real se separa mucho de lo que sugerían sus magnitudes previstas, lo que apunta a incidencias de ejecución (sobreconsumos o reperforaciones) que el modelo no puede anticipar porque no están en sus variables de entrada.

5.2.3.3. Random Forest en el modelo de pantallas de caja principal (1-102) y de caja norte (103-135)

Restringido a la caja principal, el modelo mantiene una calidad similar a la del global en la validación (R^2 0,778, MAPE 15,1 % sobre 14 reservadas) y la mejora sobre las 30 pantallas fuera del modelo: MAPE 9,8 %, 21 de 30 dentro de ±10 % y 27 dentro de ±20 %, con un MAE de 6,3 t CO_2e y un sesgo del total de +5,7 %. La Figura 26(a) muestra que la nube se ciñe a la diagonal en todo

el rango, de 44 a 172 t CO_2e. Las pantallas de esta caja son homogéneas en profundidad y tipología, y el modelo dispone de ejemplos suficientes para cubrir su rango: ese es el contexto en el que la predicción resulta más fiable.

En la caja norte el resultado es sensiblemente peor: R^2 de 0,588 y MAPE del 28,2 % sobre las 5 pantallas reservadas, y MAPE del 20,8 % sobre las 9 pantallas fuera del modelo, con solo 3 de ellas dentro de ±10 % (Figura 26(b)). El modelo sobrestima además el total de esas 9 pantallas un 9,7 %. La causa no es una menor calidad de los datos, sino el tamaño de la muestra. El modelo tiene muy pocos ejemplos por tramo, al contar solamente con 19 pantallas. El error de una única pantalla atípica (la de mayor huella de la caja, predicha muy por debajo) pesa mucho en las métricas. Este resultado delimita el contexto de validez: por debajo de unas 25 pantallas de entrenamiento la predicción del Random Forest no es fiable.

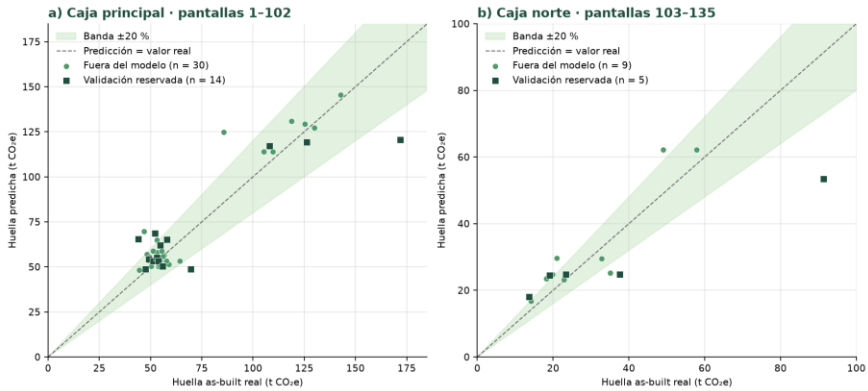

Figura 26. Huella prevista *As-built* frente a huella *As-built* real en los modelos entrenados por separado para (a) la caja principal y (b) la caja norte. Cuadrados: pantallas reservadas de validación; círculos: pantallas fuera del modelo. Banda sombreada: ±20 %. (Elaboración propia).

5.2.3.4. Random Forest en el modelo de pantallas de transferencia de cajas. Entrenado con principal, predicción con caja norte

La prueba más exigente consiste en entrenar el modelo únicamente con la caja principal y aplicarlo a las 33 pantallas de la caja norte. El resultado es un fracaso claro y muy instructivo: el MAPE se dispara al 149 % y el modelo sobrestima el total de la caja norte un 94%. La Figura 27 explica el mecanismo: las pantallas de la caja norte, con la mitad de profundidad, tienen huellas de 14 a 91 t CO_2e, pero el modelo nunca vio en su entrenamiento una pantalla por debajo de 44,0 t. Un Random Forest no extrapola: para cualquier pantalla más pequeña que las de su entrenamiento devuelve aproximadamente la huella de las pantallas más pequeñas que conoce, por lo que a las pantallas de 14-20 t les asigna entre el triple y el cuádruple de su valor real.

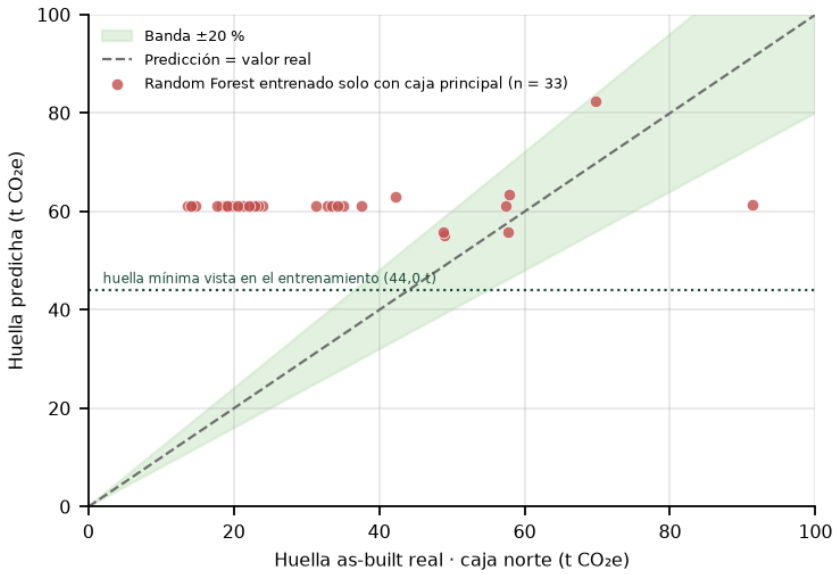

Figura 27. Aplicación a la caja norte del modelo entrenado solo con la caja principal (33 pantallas). La línea de puntos marca la huella mínima presente en el entrenamiento; por debajo de ella el modelo no puede extrapolar y devuelve un valor casi constante. (Elaboración propia).

Este resultado no invalida el módulo, al contrario, aclara cómo debe usarse. El modelo global funciona bien en ambas cajas. Su población de desarrollo se seleccionó repartida a lo largo de todo el rango de huella de la obra. Es decir,

cada pantalla nueva tiene pantallas parecidas en el entrenamiento. De todo ello se deduce una regla práctica. Los grupos de K-Means ya la hacían visible. El rango de las pantallas a predecir debe estar cubierto por el rango de las pantallas de entrenamiento. Si en una obra se incorpora un recinto con geometría distinta, las primeras pantallas ejecutadas de ese recinto deben incorporarse al entrenamiento antes de utilizar la predicción.

5.2.4. Interpretación del modelo con SHAP

Los valores SHAP indican cuánto empuja cada variable la predicción de una pantalla hacia arriba o hacia abajo respecto a la pantalla media. La Figura 28 compara la cuota de importancia SHAP de cada variable (impacto medio en valor absoluto, normalizado al 100 %) en el modelo global y en los dos modelos por caja. La Tabla 49 añade el sentido del efecto.

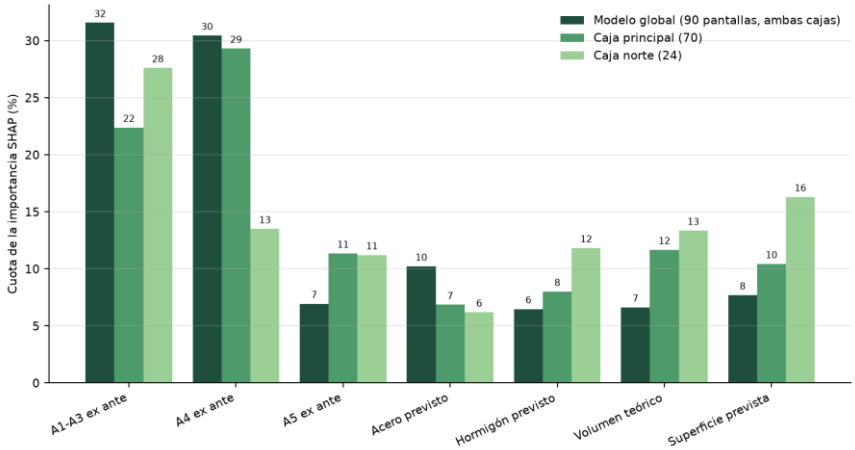

Figura 28. Cuota de la importancia SHAP de cada variable en el modelo global, en el modelo de la caja principal y en el de la caja norte, calculada sobre las pantallas fuera de cada modelo. (Elaboración propia).

Tabla 49. Cuota de importancia SHAP por variable en los tres modelos. (Elaboración propia)

Variable	Modelo global	Caja principal	Caja norte	Sentido del efecto
A1-A3 *Ex ante* (kg CO_2e)	32 %	22 %	28 %	Positivo: a mayor valor, mayor huella predicha
A4 *Ex ante* (kg CO_2e)	30 %	29 %	13 %	Positivo: a mayor valor, mayor huella predicha
A5 *Ex ante* (kg CO_2e)	7 %	11 %	11 %	Positivo: a mayor valor, mayor huella predicha
Acero previsto (kg)	10 %	7 %	6 %	Positivo: a mayor valor, mayor huella predicha
Hormigón previsto (m^3)	6 %	8 %	12 %	Positivo: a mayor valor, mayor huella predicha
Volumen teórico (m^3)	7 %	12 %	13 %	Positivo: a mayor valor, mayor huella predicha
Superficie prevista (m^2)	8 %	10 %	16 %	Positivo: a mayor valor, mayor huella predicha

En los tres casos la correlación entre el valor de cada variable y su contribución SHAP es positiva y superior a +0,8, salvo el acero previsto en la caja principal (+0,4).

Dos grupos de variables se reparten la importancia. Las emisiones *Ex ante* (A1-A3 y A4) concentran entre el 41 % (caja norte) y el 62 % (modelo global) de la cuota, y las magnitudes físicas (volumen, superficie, hormigón, acero) el resto, con un 6-16 % cada una. En todas las variables el sentido es el esperado: pantallas mayores, con más material o más maquinaria prevista reciben

predicciones más altas, lo que da coherencia física al modelo. La jerarquía es además consistente con el cálculo ACV, donde los materiales A1-A3 suponen alrededor del 75 % de la huella *As-built* de la obra, y con la lectura de K-Means, según la cual la huella es esencialmente proporcional al tamaño.

Merece un comentario aparte la variable A4 *Ex ante* (transporte), que es la de mayor cuota en el modelo de la caja principal (29 %) y la segunda en el modelo global (30 %, casi a la par de A1-A3, con el 32 %), pese a que el transporte representa apenas el 1,2 % de la huella total. La explicación está en cómo se calcula A4 y en qué mide SHAP. En HUELLA la emisión de transporte *Ex ante* se obtiene de los litros de gasóleo consumidos: número de viajes previstos multiplicado por la distancia de ida y de retorno a cada centro de suministro y por el consumo del vehículo cargado y en vacío, y ese consumo multiplicado por el factor de emisión del gasóleo. El número de viajes se deriva de la cantidad de material prevista (volumen de hormigón entre la capacidad de la hormigonera, peso de acero entre la carga del tráiler), de modo que A4 crece con el tamaño de la pantalla y, además, incorpora la distancia a cada centro y el tipo de vehículo, información que ninguna otra variable contiene. SHAP no mide cuánto pesa una variable en la suma de emisiones, sino cuánta información aporta al modelo para distinguir unas pantallas de otras, y A4 resulta ser un resumen muy eficaz de tamaño y logística. En la caja norte, donde las pantallas son más homogéneas y la logística varía poco, esa información adicional pierde valor y la cuota de A4 cae al 13 %, al nivel de las variables geométricas, y son A1-A3 (28 %) y la superficie prevista (16 %) las que pasan a dominar. Esta comprobación confirma que A4 actúa como indicador anticipado de la huella y no como causa: las palancas de reducción siguen siendo los materiales A1-A3, como muestra el cálculo ACV.

Una segunda precaución de lectura es que las siete variables están fuertemente correlacionadas entre sí, porque todas crecen con el tamaño de la pantalla. Cuando varias variables llevan la misma información, los árboles del modelo eligen una para realizar sus cortes y las demás quedan con menos protagonismo, aunque físicamente sean equivalentes.

5.3. Discusión / Interpretación

A1-A3 representa el 74,51 % del *As-built*, A4 el 1,18 % y A5 el 24,32 %. El hormigón y el acero suman el 66,73 % de la huella total.

El desglose de las emisiones por módulos muestra que la reducción de la huella total no se produce en todas las fases. Entre los escenarios Proyecto y *As-built*, las emisiones del transporte de materiales hasta la obra (A4) aumentan un 16,22 %. Sin embargo, las disminuciones de las emisiones de fabricación de materiales (A1-A3) y de ejecución (A5) compensan este incremento, de modo que la huella total A1-A5 disminuye un 30,28 %

El desglose A5 identifica la relevancia del equipo de lodos junto a la hidrofresa.

La descomposición de materiales demuestra que la reducción A1-A3 frente a Modificado no procede de una disminución general de cantidades. Los cambios de factor aportan −1.210,40 t CO_2e y compensan aumentos por cantidad y por el volumen de mortero de las reperforaciones. Esta contribución depende de la representatividad de las fuentes, especialmente del factor de hormigón 200 kg CO_2e/m³ adoptado mediante ficha comercial.

5.3.1. Resultados del inventario

5.3.1.1. Módulos dominantes

Los resultados muestran un claro predominio de los materiales en la huella *As-built*. El módulo A1-A3 genera 5.898,47 t CO_2e, lo que representa el 74,51 % de las emisiones totales, y presenta una intensidad de 303,16 kg CO_2e/m^3. El módulo A5 alcanza 1.925,20 t CO_2e, equivalentes al 24,32 % del total, con una intensidad de 98,95 kg CO_2e/m^3. Por su parte, A4 aporta 93,06 t CO_2e, únicamente el 1,18 % de las emisiones, y una intensidad de 4,78 kg CO_2e/m^3.

Dentro de A1-A3, el principal foco de emisión es el hormigón, con 4.034,84 t CO_2e y una intensidad de 207,38 kg CO_2e/m^3, lo que supone el 50,97 % de toda la huella A1-A5. Le sigue el acero, con 1.247,94 t CO_2e, una intensidad de 64,14 kg CO_2e/m^3 y una participación del 15,76 %. Ambos materiales concentran conjuntamente el 66,73 % de las emisiones *As-built*. El mortero aporta 453,79 t CO_2e, equivalentes a 23,32 kg CO_2e/m^3, mientras que la bentonita genera 161,89 t CO_2e, con una intensidad de 8,32 kg CO_2e/m^3.

Dentro de A5, las emisiones se concentran principalmente en la hidrofresa y en los equipos de lodos. La hidrofresa, incluyendo perforación y reperforación, genera aproximadamente 756,60 t CO_2e y presenta una intensidad de 38,89 kg CO_2e/m^3. Los equipos de lodos alcanzan aproximadamente 697,66 t CO_2e, con una intensidad de 35,86 kg CO_2e/m^3. Entre ambos procesos concentran alrededor de tres cuartas partes de las emisiones de A5. La grúa aporta aproximadamente 265,09 t CO_2e, equivalentes a 13,62 kg CO_2e/m^3, mientras que el transporte de tierras genera 175,61 t CO_2e, con una intensidad de 9,03 kg CO_2e/m^3. Estos resultados muestran que el análisis de la ejecución no debe centrarse exclusivamente en la hidrofresa, ya que los equipos de lodos presentan una contribución ambiental de magnitud muy similar.

5.3.1.2. Materiales

Para interpretar la diferencia entre los escenarios Modificado y *As-built*, se descompone la variación de las emisiones entre el efecto asociado al cambio de cantidad y el efecto asociado al cambio del factor de emisión. Se calcula primero el efecto de la cantidad con el factor de Modificado y después el efecto del cambio de factor sobre la cantidad *As-built*. En el hormigón se utiliza la mezcla registrada de factores 273 y 200. El mortero se presenta como flujo explícito sin pareja material equivalente en la referencia, no como una reducción o mejora de diseño demostrada.

Tabla 50. Descomposición de A1-A3: Modificado → *As-built*. (Elaboración propia)

Material	Cantidad ($t\ CO_2e$)	Factor ($t\ CO_2e$)	Material nuevo ($t\ CO_2e$)	Cambio neto ($t\ CO_2e$)
Hormigón	+266,82	−1.029,45	0,00	−762,62
Acero	+237,18	−180,95	0,00	+56,23
Bentonita	+135,87	0,00	0,00	+135,87
Mortero	0,00	0,00	+453,79	+453,79
Total	**+639,87**	**−1.210,40**	**+453,79**	**−116,73**

En la Tabla 50 se puede ver que las emisiones A1-A3 del escenario *As-built* son 116,73 t CO_2e menos que las del Modificado, sin embargo, esta reducción no se debe a un menor consumo de materiales, de hecho, el aumento de las cantidades incrementa las emisiones en 639,87 t CO_2e utilizando los mismos factores y la aparición del mortero añade otras 453,79 t CO_2e. Ambos efectos quedan compensados por la reducción asociada al cambio de los factores de emisión, principalmente el del hormigón.

Como se ha visto en el apartado 5.1.2 la bentonita genera, a partir de un consumo registrado de 326.400 kg en el escenario *As-built*, 161,89 t CO_2e que corresponden al 2,04 % de la huella total. Este valor es considerablemente superior a los 52.467,87 kg considerados en el escenario *Ex ante* Modificado.

Sin embargo, esta diferencia no debe interpretarse directamente como un sobreconsumo durante la ejecución, ya que las cantidades de los escenarios *Ex ante* proceden de valores teóricos incluidos en los descompuestos de proyecto y no de un balance específico del circuito de lodos bentoníticos. En la ejecución de las pantallas el volumen excavado debe mantenerse ocupado por el fluido de sostenimiento (lodos). Antes del hormigonado la suspensión debe presentar las condiciones adecuadas de limpieza y calidad. Parte de este lodo puede ser desarenado, regenerado y reutilizado en sucesivos paneles, por lo que el consumo real de bentonita seca depende tanto del volumen excavado y reperforado como de las pérdidas, renovaciones y capacidad de recuperación del sistema. La bibliografía técnica sitúa habitualmente la preparación de los lodos para pantallas en el entorno de 30–60 kg de bentonita por metro cúbico de suspensión. Este valor no puede trasladarse directamente al consumo por metro cúbico de pantalla debido a la recirculación del fluido, por lo tanto, la diferencia observada entre los escenarios pone de manifiesto principalmente la limitada representatividad del valor teórico empleado en la estimación *Ex ante*.

5.3.1.3. Diferencia entre escenarios (estimación y ejecución)

Los tres escenarios muestran una evolución diferente según se analicen las emisiones totales o la intensidad de carbono por unidad de volumen. En términos globales, las emisiones disminuyen progresivamente desde 11.355,74 t CO_2e en Proyecto hasta 9.574,25 t CO_2e en Modificado y 7.916,73 t CO_2e en *As-built*. Esto supone una reducción del 15,69 % entre Proyecto y Modificado, del 17,31 % entre Modificado y *As-built* y del 30,28 % entre Proyecto y *As-built*. Esta diferencia no debe interpretarse como un ahorro atribuible a la ejecución.

La evolución de la intensidad no sigue exactamente el mismo patrón. El escenario Proyecto presenta 511,83 kg CO_2e/m^3, mientras que el Modificado aumenta hasta 547,44 kg CO_2e/m^3, lo que representa un incremento del 6,96 %. Posteriormente, el *As-built* disminuye hasta 406,90 kg CO_2e/m^3, situándose un 25,67 % por debajo del Modificado y un 20,50 % por debajo del Proyecto.

Esto es importante porque indica que la mejora del escenario Modificado frente al Proyecto se debe principalmente a una reducción del volumen total ejecutado, no a una menor intensidad de emisiones por metro cúbico. Es decir, el resultado global mejora porque se ejecuta menos cantidad de pantallas aunque cada metro cúbico resulta algo más intenso en carbono.

Esta diferencia entre emisiones totales e intensidad demuestra que ambos indicadores responden a aspectos distintos. Las emisiones agregadas están condicionadas por la cantidad global de obra considerada en cada escenario, mientras que la intensidad permite valorar el comportamiento ambiental por unidad de volumen. Por ello, una reducción de las emisiones totales no implica necesariamente una mejora de la eficiencia ambiental. El caso del Modificado lo evidencia claramente, aunque presenta menos emisiones globales que el Proyecto, su intensidad es superior. La comparación conjunta de ambos indicadores permite distinguir mejor los efectos asociados a los cambios de diseño, las cantidades de obra, los factores de emisión y las condiciones reales de ejecución.

Entre Modificado y *As-built*, las emisiones A1-A3 solo disminuyen 116,73 t CO_2e, y lo hacen porque el cambio de los factores de emisión (−1.210,40 t CO_2e, de las cuales −1.029,45 t CO_2e corresponden al hormigón, cuyo factor procede de una ficha comercial) compensa el aumento de las cantidades

(+639,87 t CO_2e) y la aparición del mortero de reperforaciones (+453,79 t CO_2e). La reducción de A5 respecto a Proyecto (−50,78 %) depende a su vez de las hipótesis *Ex ante* de horas y consumos, por lo que los datos no permiten atribuirla por sí solos a una ejecución más eficiente.

Los resultados del apartado 5.1.3 muestran que aunque la huella total A1-A5 disminuye entre Proyecto y *As-built*, las emisiones asociadas al transporte de suministro aumentan un 16,22 %. Esta diferencia responde a la logística realmente ejecutada, que incorpora las cantidades efectivamente suministradas, los recorridos y viajes realizados y nuevos flujos no contemplados inicialmente, como el mortero de las reperforaciones. Además, al ser menor el volumen de referencia *As-built*, el incremento es más acusado en términos de intensidad, que pasa de 3,61 a 4,78 kg CO_2e/m^3.

5.3.1.4. Intensidad pantallas

En el apartado 5.2.2 el análisis realizado con K-Means identificados grupos de pantallas que se diferencian principalmente por su tamaño y geometría, mientras que sus intensidades medias son similares con valores de 413 y 392 kg CO_2e/m^3. Por tanto, esta clasificación no debe interpretarse como una separación entre pantallas más o menos eficientes sino como una agrupación asociada fundamentalmente a sus dimensiones. Esta interpretación es coherente con la comparación entre los escenarios *Ex ante* Proyecto y *Ex ante* Modificado. En este caso, el volumen total de pantallas se reduce de 22.186,65 a 17.489,29 m^3 (21,17 %) y las emisiones totales disminuyen de 11.355,74 a 9.574,25 t CO_2e (15,69 %). Sin embargo, la intensidad aumenta de 511,83 a 547,44 kg CO_2e/m^3 (6,96 %) lo que muestra que la reducción de

la huella total se debe principalmente a la disminución del volumen de obra y no a una mejora de la intensidad por unidad ejecutada.

Tras analizar los paneles de la Tabla 35 se puede decir que las huellas más elevadas se concentran en elementos de gran tamaño o afectados por reperforaciones, como las pantallas 58 y 113, mientras que las mayores intensidades aparecen cuando existen consumos elevados de maquinaria o materiales que se distribuyen sobre volúmenes relativamente pequeños, como ocurre en las pantallas 11 y 127. Por el contrario, una huella absoluta elevada puede tener con una baja intensidad cuando el volumen ejecutado es grande, como demuestra la pantalla 100. Esta diferencia confirma la necesidad de analizar conjuntamente emisiones totales e intensidad normalizada y no interpretarlas de forma aislada.

En el escenario *As-built* se ha obtenido una intensidad de 406,90 kg Co_2e/ m^3 en la Tabla 44.

Para comprobar si el valor de intensidad obtenido está en rango, se compara con referencias externas. A partir de los factores españoles de hormigón y acero y de la cuantía de armadura del caso, se obtiene una referencia orientativa de unos 380-390 kg CO_2e/m^3 (apartado 4.2.7.1), mientras que Rausch et al. (2026) publican para pantallas convencionales ejecutadas en Alemania valores A1-A5 equivalentes a 363-455 kg CO_2e/m^3. La intensidad As-built de 406,90 kg CO_2e/m^3 se sitúa dentro del intervalo europeo y ligeramente por encima de la referencia derivada, diferencia compatible con partidas que esta no recoge, como el mortero de las reperforaciones (23,32 kg CO_2e/m^3) o la bentonita (8,32 kg CO_2e/m^3). Esta coincidencia no válida por

sí sola el inventario, ya que las referencias difieren en geometría, materiales y método de excavación, pero confirma que el resultado tiene un orden de magnitud coherente.

5.3.1.5. Calidad del dato

Como ya se anticipó en el apartado 3.2.7, la ausencia de emisiones clasificadas como LoC-A no implica que el inventario carezca de datos primarios. El Nivel de Certeza del resultado se determina de forma conservadora adoptando el nivel menos favorable entre los datos de actividad, los factores de emisión y los criterios de asignación que intervienen en el cálculo. Por este motivo, una cantidad directamente documentada puede generar un resultado LoC-B o LoC-C cuando el factor de emisión o el criterio de reparto presenta un nivel de certeza inferior.

La comparación de los Niveles de Certeza entre escenarios muestra una mejora de la calidad de la información en el *As-built* respecto a las estimaciones *Ex ante*. Mientras que Proyecto y Modificado se apoyan íntegramente en resultados LoC-C, la incorporación de documentación real de obra permite que el 51,39 % de las emisiones *As-built* alcance un nivel LoC-B. Sin embargo, existe margen de mejora de la calidad del inventario mediante la sustitución progresiva de factores genéricos, estimaciones y repartos indirectos por información específica y directamente documentada. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de mejorar la disponibilidad, trazabilidad y representatividad de los datos primarios de obra para aumentar la fiabilidad de la cuantificación ambiental.

5.3.2. Resultados IA

Los tres algoritmos incorporados a la aplicación HUELLA cumplen una función distinta y complementaria. Por ello ninguno reemplaza a los otros.

Isolation Forest ha demostrado su utilidad como filtro de control de calidad de los datos *As-built*. Sobre 133 pantallas ejecutadas ha señalado únicamente tres (102, 127 y 126) cuya combinación de horas de hidrofresa, consumo de hormigón, incidencias y huella se aparta del comportamiento general de la obra. El valor práctico no está en la alerta en sí, sino en que dirige la atención del técnico a un número muy reducido de pantallas que conviene revisar antes de dar por buenos los registros, algo que en una obra con más de un centenar de pantallas no es viable hacer una a una.

K-Means ha permitido descubrir, sin ninguna hipótesis previa y de forma autónoma, que la obra se organiza en dos familias de pantallas. Al ser prácticamente la misma, la intensidad por metro cuadrado de ambos grupos, se puede extraer una clara conclusión. Las diferencias de huella entre pantallas responden a su tamaño y no a una ejecución más o menos eficiente, de tal forma que las medidas de reducción deben orientarse hacia el diseño geométrico y los materiales más que hacia el proceso constructivo.

Random Forest, entrenado exclusivamente con la huella real de pantallas ya ejecutadas, ha alcanzado un R^2 de 0,859 y un error medio del 14,6 % sobre las pantallas reservadas para validación, con un sesgo global de −1,2 % en las 43 pantallas de comprobación externa, es decir, a medida que la obra avanza, el modelo es capaz de anticipar la huella de las pantallas pendientes con una precisión suficiente para gestionar el proyecto, y que la suma de sus predicciones apenas se desvía del total real. El análisis SHAP añade transparencia a esa predicción al mostrar que las emisiones de materiales

previstas y el transporte previsto son las variables que más pesan, lo que a su vez indica dónde actuar.

Por otra parte, con los resultados obtenidos a partir de las diferentes hipótesis de entrenamiento, se puede afirmar que la calidad del modelo depende del volumen de datos disponible. La caja principal con cien pantallas se predice mejor que la caja norte, con treinta y tres. De igual modo se ha demostrado que un modelo entrenado en una caja no se debe trasladar a otra que tiene pantallas de distinta geometría sin reentrenar.

Los tres algoritmos son complementarios y configuran un ciclo de trabajo completo. Isolation Forest depura los datos, K-Means los estructura y Random Forest los convierte en predicción.

CAPÍTULO 6: PROPUESTA DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

6.1. Análisis de sensibilidad

Para poder identificar las variables con mayor influencia sobre la huella de carbono del escenario *As-built*, se realiza un análisis de sensibilidad mediante la reducción independiente del 10 % de cada uno de los parámetros considerados manteniendo constante el resto de variables. Este procedimiento permite comparar su incidencia relativa sobre la intensidad global de emisiones y establecer un orden de prioridad de actuación.

Tabla 51. Análisis de sensibilidad de la intensidad de emisiones del *As-built*. (Elaboración propia)

Variable analizada	Variación aplicada	Reducción de intensidad esperada (kg CO_2e/m^3)	Reducción respecto al total esperada (%)
Factor de emisión del hormigón	−10 %	−20,74	−5,097
Consumo de gasóleo de maquinaria	−10 %	−8,94	−2,196
Factor de emisión del acero	−10 %	−6,41	−1,576
Distancia de transporte de tierras	−10 %	−0,90	−0,222
Distancias de transporte A4	−10 %	−0,48	−0,118
Consumo de agua	−10 %	−0,06	−0,014

Los resultados muestran que para el caso de estudio la sensibilidad mayor se concentra en los materiales y en el consumo de combustible de la maquinaria. En particular, la reducción del factor de emisión del hormigón presenta el efecto más significativo, seguida de la disminución del consumo de gasóleo de los equipos de ejecución y del factor de emisión del acero. Por el contrario, las variaciones asociadas a las distancias de transporte y al consumo de agua producen modificaciones de menor magnitud sobre la intensidad global.

Estos resultados permiten orientar las medidas de reducción hacia las variables con mayor capacidad potencial de influencia sobre la huella de carbono.

Los porcentajes obtenidos no representan ahorros reales alcanzados en obra sino la respuesta del modelo ante una modificación independiente del 10 % de cada variable. Antes de trasladar estas alternativas a una actuación concreta se debe comprobar su viabilidad estructural, constructiva, económica y logística, garantizando las prestaciones y requisitos técnicos de la solución. Las reducciones de la tabla no deben sumarse automáticamente ya que la implantación simultánea de varias medidas puede generar interacciones entre variables.

6.2. Propuestas de reducción de emisiones

El análisis de sensibilidad del apartado anterior ordena las variables del cálculo según su capacidad teórica de modificar el resultado. Las propuestas que se recogen a continuación traducen ese orden en medidas concretas sobre la unidad de obra analizada. Se han seleccionado con 3 criterios: que actúen sobre las partidas identificadas como dominantes en el apartado 5.3.1.1, que puedan cuantificarse con el propio inventario y que sean simulables en el módulo de Optimización de la aplicación HUELLA antes de adoptarse. Las cifras que acompañan a cada medida son potenciales teóricos calculados sobre el escenario *As-built*, cuya huella asciende a 7.916,73 t CO_2e y cuya intensidad es de 406,90 kg CO_2e/m^3. No constituyen, por tanto, ahorros verificados en obra.

Se fijan las referencias de magnitud de 406,90 kg CO_2e / m^3 de pantalla y 405,55 kg CO_2e/ m^2 para poder estimar de forma inmediata el efecto de

cualquier decisión que modifique la cantidad de obra y sitúe el diseño geométrico como el primer nivel de actuación por delante de las decisiones de producto y proceso.

Medidas sobre el diseño de la unidad de obra

Tras el análisis del apartado 5.3.1.4 , una de las posibles vías de reducción en fase de proyecto consiste en optimizar el volumen de pantalla previsto siempre que se mantengan las condiciones estructurales y geotécnicas exigidas. Como aproximación teórica y manteniendo constante la intensidad del escenario *As-built*, una reducción del 1 % del volumen supondría una disminución del orden de 79 t CO_2e. De este modo, una reducción del 5 % obtenida mediante la revisión del espesor, el empotramiento o la modulación de los paneles representaría aproximadamente 396 t CO_2e que corresponden con el 5 % de la huella total. Se trata por tanto de una de las medidas con mayor potencial estimado. Su aplicación queda limitada a la fase de proyecto y condicionada por las necesidades estructurales y geotécnicas de la obra.

Medidas sobre los materiales (A1-A3)

La selección del hormigón es la medida de mayor recorrido una vez fijada la geometría ya que aporta 4.034,84 t CO_2e que suponen el 50,97 % de la huella A1-A5 y se ha suministrado con dos factores distintos: 4.448,50 m^3 con 273 kg CO_2e/m^3 y 14.102,00 m^3 con 200 kg CO_2e/m^3, quedando un factor medio ponderado de 217,50 kg CO_2e/m^3. Extender el producto de menor factor a la totalidad del volumen suministrado evitaría 324,74 t CO_2e, un 4,10 % de la huella total sin modificar ninguna cantidad. Cada reducción adicional del 10 % del factor medio equivale a 403,48 t CO_2e, un 5,10 %. La medida exige comprobar que la dosificación mantiene las prestaciones exigidas para el

hormigonado sumergido bajo lodos bentoníticos, en particular la fluidez, la cohesión y el tiempo abierto. Además, exige acreditar el factor mediante Declaración Ambiental de Producto del lote suministrado.

La reducción de rechazos y sobrantes actúa sobre la cantidad y no sobre el factor. Los 263,00 m³ rechazados y los 59,50 m³ sobrantes suman 322,50 m³ de hormigón fabricado que no se incorpora a las pantallas y que generan 64,50 t CO_2e, el 0,81 % de la huella total, porque la carga ambiental de fabricación ya se ha producido. Eliminar la mitad de esa cantidad evitaría 32,25 t CO_2e además del transporte asociado. Se propone intentar ajustar el pedido al volumen teórico del panel más el sobreconsumo previsto, coordinando el ritmo de suministro con el de hormigonado e intentando tener otros tajos preparados para poder aprovechar los sobrantes en otras unidades de la obra. El inventario permite además seguir panel a panel la relación entre hormigón suministrado, hormigón incorporado y volumen teórico, lo que convierte esa relación en un indicador de control de la sobreexcavación durante la ejecución.

El acero ocupa la segunda posición con 1.247,94 t CO_2e y el 15,76 % de la huella. Admite dos propuestas de actuación de efecto similar: reducción del 10 % del factor de emisión y reducción del 10 % de la cuantía, que suponen cada una 124,79 t CO_2e, 1,58 % del total. La primera depende del suministrador y debe acreditarse documentalmente. La segunda tiene margen en el caso estudiado, ya que la cantidad *As-built* (3.020.920,29 kg) supera en algo más de medio millón de kilogramos la prevista en el escenario Modificado, diferencia que la Tabla 50 cuantifica en +237,18 t CO_2e. Revisar los despieces, los solapes, las longitudes de jaula y la armadura de montaje es importante para intentar reducir la huella lo máximo posible, garantizando

que se cumplan los requisitos estructurales. La optimización estructural es necesaria en la fase de proyecto e inicio de obra, como se ha visto en el caso de estudio.

Las reperforaciones merecen tratamiento propio porque concentran un potencial elevado y no figuran en los escenarios previos. Los 1.392,00 m^3 del mortero de relleno aporta 453,79 t CO_2e, el 5,73 % de la huella, y aparece en la descomposición de la Tabla 50 como flujo nuevo, es decir, como una partida generada íntegramente por la ejecución. A esto se añaden las 27,53 t CO_2e de las 69 horas de hidrofresa dedicadas a reperforación que dan el total de 481,32 t CO_2e, el 6,08 % del total de la huella. Reducir las reperforaciones a la mitad evitaría 240,66 t CO_2e un 3,04 %. Se proponen las siguientes medidas: control de la verticalidad y del guiado de la hidrofresa, revisión del replanteo y de la mordida entre paneles, ajuste de la secuencia de primarias y secundarias, reconocimiento previo de las zonas con mayor riesgo de desviación.

Medidas sobre la ejecución (A5)

El gasóleo de la maquinaria de ejecución representa 528.652,58 L y 1.738,47 t CO_2e (21,96 % de la huella total) de modo que cada punto porcentual de reducción del consumo o del factor equivale a 17,4 t CO_2e. Una reducción del 10 % supone 173,85 t CO_2e (2,20 %). Se ordenan a continuación actuaciones posibles:

- La primera medida es de medición y no de ahorro. El consumo del equipo de lodos (212.152,00 L) genera 697,66 t CO_2e que se reparten en el inventario a partir del volumen excavado y no de horas medidas por no disponer de datos. El cálculo actual no permite distinguir un

funcionamiento eficiente de otro con esperas por lo que instalar contadores de combustible y registrar horas y paradas por equipo es la condición previa a cualquier medida sobre esta partida que representa el 36,24 % del módulo A5.

- La reducción de tiempos de espera y de funcionamiento en vacío de la planta de lodos y de la grúa mediante el dimensionamiento del desarenado y la parada de equipos durante las interrupciones del ciclo.
- El mantenimiento y la adecuación de la hidrofresa a las condiciones del terreno.
- La sustitución del gasóleo por combustibles alternativos como el aceite vegetal hidrotratado cuyo factor debe acreditarse mediante certificado del suministrador. Cada punto porcentual de reducción sobre el factor de 3,2885 kg CO_2e/L equivale a 17,4 t CO_2e.
- La conexión a la red eléctrica de los equipos estáticos. Alternativa que el inventario admite ya que el módulo A5 contempla el vector eléctrico con consumo nulo en el caso analizado y cuyo balance debe evaluarse con el factor de la red aplicable en el momento de la ejecución.

El transporte de tierras contabilizado dentro de A5 aporta 175,61 t CO_2e (9,12 % del módulo). Su reducción pasa por la elección de gestores autorizados más próximos, la utilización de cargas completas y la valorización en la propia obra de la fracción admisible. Una reducción del 10 % de la distancia o del número de viajes evitaría 17,56 t CO_2e (0,22 % del total).

Medidas sobre el transporte de suministro (A4)

En el apartado 5.1.3 el módulo A4 aporta 93,06 t CO_2e (1,18 % de la huella) pero es el único cuya intensidad aumenta entre Proyecto y *As-built* (3,61 a 4,78 kg CO_2e/m^3). La aproximación de las plantas de suministro, la agrupación

de cargas, la reducción de los retornos en vacío y la disminución de los viajes con hormigón rechazado constituyen medidas de coste reducido y aplicación inmediata, aunque su efecto sea limitado: una reducción del 10 % de las distancias y de los retornos en vacío evitaría 9,31 t CO_2e (0,12 % del total). Su interés no reside en la magnitud del ahorro sino en que se trata del único módulo que empeora respecto a la previsión y su control no compite con ninguna decisión estructural.

Medidas de gestión:

Las medidas anteriores requieren detectar la desviación cuando todavía queda obra por ejecutar. El empleo continuado de la aplicación HUELLA durante la ejecución cumple esa función: Isolation Forest actúa como filtro de control de calidad, al reducir la revisión a un número muy pequeño de pantallas, Random Forest anticipa la huella de las pantallas pendientes con un R^2 de 0,859 y un sesgo del total del −1,2 %, lo que permite estimar el resultado final de la unidad antes de terminarla y el módulo de Optimización permite simular cada una de las medidas propuestas sobre el alcance seleccionado antes de adoptarla. Esta actuación no reduce emisiones por sí misma, pero es la que hace posible aplicar medidas en el momento en que todavía tienen efecto.

Tabla 52. Medidas de reducción propuestas, módulo y potencial estimado sobre el *As-built*. (Elaboración propia)

Medida	Módulo	Potencial estimado (t CO_2e)	% sobre *As-built*	Condición de aplicación
Ajuste de la geometría: reducción del 5 % del volumen ejecutado	A1-A5	≈ 396	≈ 5,00	Fase de proyecto, condicionado por el cálculo estructural y geotécnico

Medida	Módulo	Potencial estimado (t CO_2e)	% sobre *As-built*	Condición de aplicación
Hormigón de menor factor: reducción del 10 % sobre el factor medio (217,50 kg CO_2e/m^3)	A1-A3	403,48	5,10	Prestaciones para hormigonado sumergido, acreditación mediante DAP
Homogeneización del hormigón suministrado en 200 kg CO_2e/m^3	A1-A3	324,74	4,10	Disponibilidad del producto en planta y validación del factor
Reducción a la mitad de las reperforaciones (mortero de relleno y horas de hidrofresa)	A1-A3 y A5	240,66	3,04	Control de verticalidad, replanteo y secuencia de paneles
Reducción del 10 % del consumo de gasóleo de la maquinaria de ejecución	A5	173,85	2,20	Requiere medición previa del consumo por equipo
Acero: reducción del 10 % del factor de emisión	A1-A3	124,79	1,58	Acreditación mediante DAP del producto
Acero: ajuste del 10 % de la cuantía realmente colocada	A1-A3	124,79	1,58	Decisión de proyecto y de taller, cumplimiento estructural
Bentonita: reducción del 50 % del consumo mediante regeneración y recirculación	A1-A3	80,95	1,02	Capacidad de desarenado y tratamiento en obra
Eliminación de la mitad de rechazos y sobrantes de hormigón	A1-A3	32,25	0,41	Ajuste del pedido y coordinación del hormigonado
Tierras: reducción del 10 % de la distancia o del número de viajes	A5	17,56	0,22	Gestor autorizado próximo y cargas completas
Transporte de suministro: reducción del 10 % de distancias y retornos en vacío	A4	9,31	0,12	Logística de suministro y agrupación de cargas

Los potenciales se han calculado de forma independiente sobre el escenario *As-built* (7.916,73 t CO_2e). No son acumulables ya que las medidas de cantidad y de factor interactúan entre sí.

Las medidas de cantidad y de factor se multiplican entre sí de modo que aplicar simultáneamente una reducción de volumen y una reducción del factor del hormigón produce un ahorro inferior a la suma de ambos efectos aislados. El orden de la tabla sí es significativo y confirma lo visto en el capítulo 5: materiales > ejecución > transporte de suministro.

El momento de la decisión condiciona el margen disponible ya que las medidas de mayor potencial (geometría, tipo de hormigón y cuantías de acero) se deciden en proyecto y en contratación. Una vez iniciada la ejecución dejan de estar disponibles. Durante la obra el margen se limita a la elección de los suministradores y colaboradores, al control de las reperforaciones, a los rechazos y sobrantes, al consumo de la maquinaria, al lodo bentonítico y a la logística de los transportes, partidas que en el caso analizado suman aproximadamente 550 t CO_2e de potencial. En todos los casos la elección de una medida exige comprobar previamente su viabilidad estructural, constructiva, económica y logística, decisión que corresponde al técnico competente y que la aplicación puede apoyar mediante simulación pero no sustituir.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones generales

El objetivo principal del trabajo se considera alcanzado dentro del alcance definido para el caso de estudio. Se ha desarrollado y aplicado una metodología capaz de integrar el Análisis de Ciclo de Vida, la información de proyecto, los datos reales de ejecución y técnicas de inteligencia artificial en un procedimiento común para la cuantificación y análisis de la huella de carbono de unidades constructivas individuales. La integración del inventario desarrollado en Excel con la aplicación HUELLA permite conservar la trazabilidad de los datos, reproducir los cálculos y comparar de forma estructurada los escenarios Proyecto, Modificado y *As-built*.

Los resultados del caso muestran que la huella de carbono de una obra no debe interpretarse únicamente a partir de un resultado agregado. Las diferencias entre la estimación inicial y la ejecución responden conjuntamente a cambios de diseño, cantidades, factores de emisión y condiciones reales de ejecución. La incorporación de datos procedentes de obra permite identificar estas diferencias y proporciona una representación más próxima al comportamiento realmente producido. Asimismo, la normalización de los resultados y el análisis a escala de panel permiten comparar elementos de diferente tamaño e identificar variaciones que quedarían ocultas en un análisis realizado únicamente a escala global.

La principal aportación del trabajo es la definición de una metodología, trazable y reproducible que convierte el cálculo de la huella de carbono en una herramienta potencial de apoyo a la gestión de obra mediante la aplicación HUELLA. La inteligencia artificial complementa esta metodología permitiendo detectar registros singulares, reconocer patrones y realizar

estimaciones, aunque los resultados obtenidos demuestran también que su capacidad predictiva está condicionada por las características del conjunto de datos sobre el que ha sido entrenada. En consecuencia, los modelos deben considerarse herramientas de apoyo y no sustitutos del cálculo físico ni del criterio del técnico competente.

Desde una perspectiva general, el trabajo muestra que la integración del seguimiento ambiental en los procedimientos habituales de producción puede mejorar el conocimiento sobre dónde y cómo se generan las emisiones durante la construcción. Esta información permite orientar el análisis hacia aquellos materiales y procesos sobre los que existe capacidad de actuación y facilita la evaluación previa de alternativas de reducción.

La metodología propuesta resulta válida para demostrar este enfoque en el caso analizado y presenta potencial para su aplicación a otras unidades repetitivas de obra civil, no obstante, su generalización requiere nuevas validaciones. La aplicación a otras estaciones, tipologías constructivas o infraestructuras debe realizarse adaptando el inventario, las reglas de asignación, los factores de emisión, las variables empleadas y validando nuevamente los modelos de inteligencia artificial. Por ello, la principal conclusión general no es la existencia de un modelo universal, sino la viabilidad de una arquitectura metodológica capaz de integrar cálculo ambiental, datos reales y herramientas de análisis para mejorar la trazabilidad y apoyar una gestión más informada de las emisiones de carbono en obra.

7.2. Conclusiones específicas

7.2.1. Inventario y trazabilidad

El inventario desarrollado muestra que es posible integrar a escala de panel los datos de geometría, materiales, transportes y ejecución, conservando la procedencia de la información, los factores de emisión y los criterios de asignación empleados. Los controles realizados cierran los 8.389 grupos de asignación y el conjunto de análisis queda constituido por 133 códigos de pantalla, manteniendo GENERAL y REPERFORACIONES como registros auxiliares diferenciados. La concordancia entre el Excel y la aplicación HUELLA confirma la reproducibilidad del cálculo sobre las entradas importadas, aunque no sustituye la revisión documental de los albaranes, partes y fuentes originales.

Los resultados se expresan tanto en valores absolutos por panel como en intensidad referida a la unidad funcional (1 m³ de pantalla ejecutada), lo que permite comparar paneles de distinto tamaño. En cuanto a la calidad del dato, la incorporación de la documentación de obra permite que el 51,39 % de las emisiones *As-built* alcance el nivel LoC-B, frente al 100 % LoC-C de los escenarios *Ex ante*, sin embargo, ninguna emisión alcanza el nivel LoC-A y el 48,61 % sigue siendo LoC-C, lo que muestra el margen de mejora en la disponibilidad de datos primarios.

7.2.2. Diferencias entre Proyecto, Modificado y *As-built*

La comparación entre escenarios muestra que una reducción de las emisiones agregadas no implica necesariamente una menor intensidad ambiental, ya que también intervienen las diferencias en el volumen y las cantidades consideradas en cada escenario. Esto se ha visto en los resultados del apartado 5.3.1.4 donde el escenario Modificado reduce las emisiones totales

respecto al Proyecto, pero aumenta la intensidad de carbono por unidad de volumen. Esto indica que una disminución de la huella global no implica necesariamente una mejora del comportamiento ambiental por unidad ejecutada. De ahí la importancia de normalizar los resultados y analizar conjuntamente las emisiones totales y las intensidades normalizadas, así como de separar los cambios derivados del diseño de las diferencias propias de la ejecución.

7.2.3. Materiales dominantes

El hormigón constituye el principal material emisor del caso de estudio, con una contribución *As-built* de 207,38 kg CO_2e/m^3 y el 50,97 % de la huella A1-A5. El acero ocupa la segunda posición, con 64,14 kg CO_2e/m^3 y un 15,76 %. En conjunto, hormigón y acero representan el 66,73 % de la huella calculada. En consecuencia, las decisiones asociadas a los materiales estructurales, especialmente al hormigón, condicionan en mayor medida el resultado ambiental que cualquier proceso individual de transporte o maquinaria.

7.2.4. Importancia del transporte

El transporte de suministros A4 presenta un peso reducido sobre la huella total *As-built*, con 4,78 kg CO_2e/m^3 y un 1,18 %, aunque es el único módulo cuya intensidad aumenta entre Proyecto y *As-built*, desde 3,61 kg CO_2e/m^3 hasta 4,78 kg CO_2e/m^3. La retirada de tierras se contabiliza de forma independiente dentro de A5.3 y aporta 9,03 kg CO_2e/m^3. Por tanto, el transporte debe controlarse y optimizarse, pero su potencial de reducción es menor que el asociado a los materiales y a los principales consumos de ejecución en este caso de estudio.

7.2.5. Maquinaria y procesos de ejecución

Dentro del módulo A5 las emisiones asociadas a la ejecución se concentran principalmente en la hidrofresa y en los equipos de lodos. La hidrofresa alcanza 38,89 kg CO_2e/m^3 expresada como intensidad de carbono, considerando conjuntamente perforación y reperforación, mientras que los equipos de lodos aportan 35,86 kg CO_2e/m^3. La grúa presenta una contribución menor, de 13,62 kg CO_2e/m^3.

La similitud entre las intensidades de la hidrofresa y de los equipos de lodos pone de manifiesto que el análisis de las emisiones de ejecución no debe centrarse únicamente en las horas de funcionamiento de la hidrofresa. Aunque este equipo constituye uno de los principales focos de emisión, los lodos presentan una contribución prácticamente equivalente dentro de A5. Por ello, resulta necesario registrar de forma diferenciada las horas de operación, los consumos y las emisiones asociadas a cada equipo, de modo que pueda identificarse con mayor precisión qué procesos condicionan la intensidad de carbono de la ejecución.

7.2.6. Variables que explican las emisiones

Desde el punto de vista físico del ACV la huella está condicionada principalmente por las cantidades y factores de emisión del hormigón y el acero. Dentro de A5 por los consumos asociados a hidrofresa y equipos de lodos. Desde el punto de vista predictivo, el modelo SHAP sitúa como variables más influyentes las emisiones A1-A3 *Ex ante* (32 %) y A4 *Ex ante* (30 %), seguidas del acero previsto (10 %), la superficie prevista (8 %), el volumen teórico y A5 *Ex ante* (7 % cada una) y el hormigón previsto (6 %). En el modelo de la caja principal, A4 *Ex ante* pasa a ser la primera (29 %). Que A4

tenga tanto peso, pese a suponer solo el 1,18 % de la huella, se debe a que resume el tamaño y la logística de cada pantalla: actúa como indicador anticipado, no como causa. Esta importancia es predictiva y no causal, una variable puede ser relevante para Random Forest por su relación con el tamaño o la composición del panel sin representar una contribución física equivalente en el ACV.

7.2.7. Medidas con mayor potencial de reducción

La medida con mayor potencial de reducción es tratar de elegir los productos con menor factor de emisión que cumplan las prestaciones exigidas ya que estos multiplican las cantidades consumidas.

Por otro lado, es importante hacer recálculos para optimizar las cantidades necesarias de materiales.

Durante la ejecución debe tratarse de minimizar las cantidades rechazadas y los sobreconsumos evitables.

La decisión constructiva que presenta mayor potencial de reducción de emisiones está en el hormigón como se ha visto en apartado 6.1. Después aparecen las medidas relacionadas con el consumo de combustible de la maquinaria, especialmente hidrofresa junto con equipos de lodos y el acero.

La optimización de recorridos y transportes resulta positiva, pero presenta un efecto menor sobre la huella total.

7.2.8. Aplicación HUELLA

Se ha desarrollado el prototipo HUELLA que integra en un mismo entorno el inventario, el cálculo A1-A5 de los tres escenarios, la comparación entre

escenarios, el análisis espacial sobre plano DXF, el módulo de inteligencia artificial, la simulación de medidas de reducción y el control de la calidad del dato. Sus resultados coinciden con los del inventario en Excel para las entradas importadas, lo que verifica la reproducibilidad del cálculo. Se trata de un prototipo creado para un caso de estudio, no se ha completado una batería íntegra de pruebas de software ni una evaluación de seguridad, y su utilización durante la ejecución de una obra queda pendiente de contrastar.

7.2.9. Técnicas de inteligencia artificial

Isolation Forest señala 3 de las 133 pantallas (102, 126 y 127) como atípicas. En los tres casos la alerta se explica por el tamaño o por el método de excavación, por lo que resulta útil como filtro para priorizar la revisión, no como detector de errores. K-Means separa las pantallas en dos grupos (silueta 0,673) que responden a su tamaño, con intensidades medias muy similares (413 y 392 kg CO_2e/m^3). La huella es esencialmente proporcional al tamaño y no aparecen familias más o menos eficientes. Random Forest entrenado con las pantallas ejecutadas, alcanza en el modelo global un R^2 de 0,859 y un MAPE del 14,6 % en validación y del 11,6 % en las 43 pantallas fuera del modelo, con un sesgo del total de −1,2 %. Su fiabilidad disminuye con muestras pequeñas (caja norte: R^2 0,588; MAPE 28,2 %) y se pierde al transferir el modelo entre recintos de geometría distinta (MAPE 149,3 %; sobrestimación del total del 93,9 %), ya que el algoritmo no extrapola fuera del rango de entrenamiento. Por tanto, estas técnicas son útiles como apoyo siempre que se entrenen con datos de la propia obra y se reserve una muestra de validación.

7.2.10. Uso de inteligencia artificial

Los resultados obtenidos permiten concluir que la Inteligencia Artificial puede incorporarse de forma práctica al ejercicio de la ingeniería civil como una herramienta destinada a optimizar tareas rutinarias, mejorar el tratamiento y seguimiento de la información y facilitar una gestión más ágil durante la ejecución de las obras. Su principal aportación no reside en sustituir el criterio del ingeniero, sino en liberar tiempo de tareas repetitivas y ampliar su capacidad para analizar, comparar y controlar grandes volúmenes de datos.

En este sentido, la IA abre la posibilidad de abordar tareas que hasta hace pocos años resultaban difícilmente asumibles a escala de obra, ya fuera por el volumen de información, el tiempo requerido o la necesidad de disponer de recursos especializados. Gracias a estas herramientas, el técnico puede acceder a capacidades de análisis, automatización y seguimiento antes reservadas a desarrollos más complejos, manteniendo al mismo tiempo su papel esencial en la interpretación de los resultados, la incorporación del conocimiento del proceso constructivo y la toma de decisiones.

Por tanto, el valor de la Inteligencia Artificial en la profesión no debe entenderse únicamente como una mejora de eficiencia, sino como una ampliación de las capacidades del ingeniero, al permitirle dedicar más tiempo al análisis técnico, la supervisión y la mejora de la gestión, aportando su experiencia y criterio allí donde la automatización por sí sola no puede hacerlo.

7.3. Limitaciones del estudio

El caso se limita a las unidades y procesos incluidos en la obra estudiada, sin abarcar la estación completa ni los módulos de uso, mantenimiento y fin de vida.

El inventario combina cantidades documentadas, repartos y estimaciones. Los factores WTW y del agua son aproximaciones territoriales y de proceso, y el factor de parte del hormigón procede de ficha comercial. La concordancia numérica no verifica su representatividad ni homogeneiza por sí sola todos los métodos de caracterización.

El LoC informa de procedencia y calidad, no de un intervalo probabilístico de incertidumbre.

La reproducción recalcula A1-A5 a partir de las siete tablas principales; no vuelve a ejecutar todas las hojas auxiliares de Excel ni verifica todos los albaranes originales.

No se ha completado la batería íntegra de pruebas de software, una evaluación de ciberseguridad ni todas las interacciones de la interfaz.

La metodología se ha aplicado a posteriori, sobre pantallas ya ejecutadas, y no en tiempo real durante la obra, por lo que su utilidad como herramienta de gestión durante la ejecución queda pendiente de comprobar.

Los modelos de inteligencia artificial se han entrenado con una muestra reducida (133 pantallas de una sola obra) y con variables muy correlacionadas entre sí. Random Forest no extrapola fuera del rango de entrenamiento y la importancia SHAP es predictiva, no causal.

La comparación entre escenarios depende de las hipótesis *Ex ante* de rendimientos y consumos procedentes de los descompuestos de proyecto, que condicionan la magnitud de las diferencias calculadas.

7.4. Sostenibilidad

La sostenibilidad es una pieza clave en este trabajo. Aunque el análisis desarrollado se centra en la dimensión ambiental, mediante la cuantificación y el análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la construcción, la metodología propuesta presenta también implicaciones en las dimensiones económica y social. La incorporación de datos reales de obra, el análisis de consumos y la identificación de los procesos con mayor impacto permiten relacionar la gestión ambiental con una utilización más eficiente de los recursos y con una mejora de la información disponible para la toma de decisiones durante la ejecución. En consecuencia, el trabajo no aborda la sostenibilidad únicamente como un cálculo final de emisiones, sino como un criterio que puede incorporarse a la gestión técnica de la obra optimizando el tiempo y los recursos.

La dimensión ambiental constituye el núcleo principal del estudio y se relaciona especialmente con el ODS 13, Acción por el clima. La metodología desarrollada permite cuantificar la huella de carbono de los módulos A1-A5, comparar los escenarios de Proyecto, Modificado y *As-built* e identificar los principales focos de emisión. La utilización de información real procedente de albaranes, cantidades suministradas, transportes, tiempos de funcionamiento y consumos de maquinaria permite representar con mayor precisión las condiciones efectivamente producidas durante la ejecución y evaluar posibles alternativas de reducción. Esta aproximación contribuye a

incorporar el control de las emisiones a la gestión de obra, facilitando que las decisiones ambientales se apoyen en datos trazables y actualizables.

El trabajo se vincula asimismo con el ODS 9, Industria, innovación e infraestructura, a través del desarrollo de una metodología que combina Análisis de Ciclo de Vida, digitalización de la información de obra e inteligencia artificial. La aplicación HUELLA constituye una propuesta de innovación orientada a transformar información dispersa de ejecución en datos estructurados que puedan utilizarse para calcular, comparar e interpretar el comportamiento ambiental de unidades constructivas individuales. La aportación no se limita a automatizar un cálculo, sino que integra inventario, trazabilidad, análisis granular, técnicas de aprendizaje automático y simulación de alternativas dentro de un mismo procedimiento de apoyo a la gestión.

De forma complementaria, el estudio guarda relación con el ODS 12, Producción y consumo responsables. El inventario permite diferenciar cantidades previstas, suministradas e incorporadas, así como identificar rechazos, sobrantes, consumos de combustible, agua y transportes. Esta información facilita localizar situaciones en las que una mejor planificación o control puede reducir consumos evitables sin modificar las prestaciones técnicas de la infraestructura. Entre las estrategias consideradas se encuentran el análisis de hormigones con menor factor de emisión que mantengan las prestaciones exigidas, la reducción de rechazos y sobrantes evitables, la mejora de la trazabilidad del acero, el control diferenciado de los consumos de hidrofresa, grúa y equipos de lodos y la optimización de recorridos y viajes vacíos.

La dimensión económica se aborda de forma indirecta a través de la eficiencia en el uso de recursos. Una reducción de consumos innecesarios de hormigón, acero, combustible o transporte puede implicar simultáneamente una disminución de emisiones y una menor utilización de recursos materiales y energéticos. Sin embargo, el presente trabajo no desarrolla un análisis económico específico de las alternativas propuestas, por lo que no puede afirmarse que las soluciones con menor huella sean necesariamente las de menor coste. La metodología sí permite identificar los procesos con mayor potencial ambiental de actuación y proporciona una base para incorporar en futuros desarrollos variables de coste, plazo y productividad.

La dimensión social se considera de manera más indirecta. La construcción de infraestructuras urbanas se desarrolla en entornos en los que las decisiones de obra pueden generar afecciones sobre la movilidad, el ruido, la ocupación del espacio y el funcionamiento de la ciudad. Una gestión más eficiente de materiales, maquinaria y transportes puede contribuir potencialmente a reducir movimientos innecesarios, consumos y determinadas afecciones asociadas a la ejecución.

Tabla 53. Aplicación de la sostenibilidad en el trabajo. (Elaboración propia)

Dimensión	**ODS relacionado**	**Aplicación en el trabajo**	**Propuesta estratégica**
Ambiental	ODS 13. Acción por el clima	Cuantificación A1-A5, comparación *Ex ante*/*As-built* e identificación de focos de emisión	Incorporar el seguimiento de la huella de carbono durante la ejecución y evaluar medidas de reducción antes de aplicarlas

Ambiental / económica	ODS 12. Producción y consumo responsables	Control de materiales, rechazos, sobrantes, combustibles, agua y transportes	Reducir consumos evitables, mejorar la trazabilidad y optimizar la utilización de recursos
Tecnológica / ambiental	ODS 9. Industria, innovación e infraestructura	Inventario digital, HUELLA, análisis de detalle e inteligencia artificial	Integrar el dato ambiental en los sistemas habituales de gestión y digitalización de la obra
Social / ambiental	ODS 9, 11 y 13 como marco de aplicación	Mejora potencial de la gestión de obras urbanas	Incorporar en desarrollos futuros indicadores de afecciones locales, movilidad, ruido y otros impactos sociales

En conjunto, el trabajo plantea que la mejora de la sostenibilidad en construcción no depende únicamente de seleccionar materiales con menores emisiones, sino también de disponer de información suficientemente detallada para conocer cómo se utilizan los recursos durante la obra y poder actuar sobre ellos. La principal aportación en este ámbito consiste en acercar el análisis ambiental a la gestión cotidiana de la ejecución, de manera que la huella de carbono pueda evolucionar desde un indicador calculado de forma retrospectiva hacia una variable adicional de apoyo a la toma de decisiones. Esta aproximación contribuye principalmente a la sostenibilidad ambiental y proporciona una base metodológica para incorporar en futuros desarrollos criterios económicos y sociales de forma conjunta.

7.5. Recomendaciones para el sector

Las conclusiones anteriores se refieren a un caso de estudio concreto, pero varias de las dificultades encontradas durante el trabajo no son particulares de esta obra. La ausencia de factores acreditados para el producto realmente suministrado, la falta de registros primarios de ejecución diferenciados por equipo y la inexistencia de un inventario estructurado que pueda reutilizarse son limitaciones habituales en la construcción de obra civil. Las recomendaciones que siguen se dirigen a los agentes que intervienen en el proceso —promotores y administraciones, proyectistas, empresas constructoras y suministradores— y se formulan a partir de lo observado durante la elaboración del inventario y el cálculo.

Exigir factores de emisión acreditados y trazables:

El efecto contable más relevante del caso analizado, una reducción de 1.029,45 t CO_2e, procede de un cambio en el factor del hormigón adoptado a partir de una ficha comercial. Una diferencia de esa magnitud no puede sostenerse sobre documentación de carácter comercial. Resulta necesario exigir Declaraciones Ambientales de Producto verificadas y, en la medida de lo posible, referidas al lote realmente suministrado, e incorporar esa acreditación a la documentación de recepción del material con el mismo rango con que hoy se exige el control de resistencia. Sin ella, la reducción declarada de la huella no es verificable.

Medir la ejecución con datos primarios y diferenciados por equipo:

El módulo A5 representa el 24,32 % de la huella del caso, y dentro de él la hidrofresa y los equipos de lodos presentan contribuciones prácticamente equivalentes, 38,89 y 35,86 kg CO_2e/m^3. Sin embargo, el consumo de los equipos de lodos hubo de repartirse a partir del volumen excavado por no

disponerse de horas de funcionamiento, lo que impide valorar su eficiencia. Se recomienda implantar partes diarios con horas y consumos por equipo, instalar contadores de combustible en hidrofresa, planta de lodos y grúa y registrar las paradas. El coste de esta información es reducido en comparación con el valor que aporta para identificar dónde se producen realmente las emisiones de ejecución.

Registrar la cantidad suministrada junto a la cantidad incorporada:

Los 322,50 m^3 de hormigón rechazado y sobrante del caso generan 64,50 t CO_2e que un inventario basado únicamente en la medición de proyecto no llega a ver, puesto que la carga ambiental de fabricación se produce con independencia de que el material se incorpore al elemento. Se recomienda vincular el albarán digital a la unidad de obra e identificar de forma expresa rechazos y sobrantes, práctica que además proporciona un indicador directo de control de la producción.

Declarar siempre el resultado total junto a la intensidad normalizada:

El caso analizado demuestra que ambos indicadores pueden evolucionar en sentidos opuestos: el escenario Modificado reduce las emisiones agregadas respecto al Proyecto y, sin embargo, aumenta la intensidad por unidad de volumen en un 6,96 %. Comunicar un único valor agregado permite presentar como mejora ambiental lo que únicamente es una reducción del alcance de la obra. La declaración conjunta de emisiones totales e intensidad, referida a una unidad funcional explícita, debería considerarse un requisito de comparabilidad.

Acompañar el resultado de la calidad del dato que lo sustenta:

La distribución de Niveles de Certeza obtenida, 0,00 % LoC-A, 51,39 % LoC-B y 48,61 % LoC-C, informa con honestidad de la procedencia de la información. Un resultado presentado como cifra única, sin indicación del origen de sus datos, no es comparable con otro obtenido con criterios distintos. Se recomienda incorporar una clasificación de la calidad del dato a cualquier huella declarada, aun cuando no constituya un intervalo probabilístico de incertidumbre.

Integrar el cálculo en los procedimientos habituales de producción:

La utilidad de la información ambiental depende del momento en que se dispone de ella. Calcular la huella con la misma periodicidad que la certificación mensual, y no como un informe final, permite que las desviaciones aparezcan cuando todavía queda obra sobre la que actuar. Esta recomendación no exige herramientas complejas, sino incorporar los datos de albaranes y partes al inventario con la misma disciplina con que se incorporan a la medición.

Utilizar la inteligencia artificial como apoyo y no como sustituto del cálculo:

Los modelos empleados alcanzan una precisión útil cuando se entrenan con datos de la propia obra, pero el ensayo de transferencia entre recintos de geometría distinta degradó los resultados de forma sustancial. Se recomienda entrenar con datos propios, reservar siempre una muestra de validación, no trasladar modelos entre tipologías o recintos sin reentrenamiento y mantener la interpretación y la decisión en el técnico competente. La importancia identificada mediante SHAP orienta sobre dónde actuar, pero es predictiva y no causal.

Normalizar y reutilizar la estructura del inventario. El esfuerzo principal del trabajo no ha estado en el cálculo, sino en organizar y depurar la información dispersa de la obra. Disponer de plantillas normalizadas de inventario por unidad de obra repetitiva reduce ese esfuerzo en las obras siguientes y, sobre todo, hace comparables los resultados entre proyectos. La contratación pública puede impulsar esta práctica solicitando el inventario en formato estructurado y reutilizable, y no únicamente un informe de resultados.

7.6. Futuras líneas de investigación

Las líneas de investigación propuestas se derivan directamente de los resultados y de las limitaciones del caso analizado. La huella calculada corresponde únicamente a los módulos A1-A5 de las pantallas, por lo que el primer paso es extender la metodología al resto de unidades de la estación y a las etapas de uso y fin de vida. Que el 48,61 % de las emisiones *As-built* siga clasificado como LoC-C y ninguna alcanza el nivel LoC-A, que el mayor efecto individual entre Modificado y *As-built* (−1.029,45 t CO_2e) proceda de un factor del hormigón tomado de una ficha comercial, justifica exigir DAP verificadas y tratar la incertidumbre. En la ejecución, la hidrofresa (756,60 t CO_2e) y los equipos de lodos (697,66 t CO_2e) concentran tres cuartas partes del módulo A5, pero el consumo de los lodos tuvo que repartirse por volumen excavado al no disponerse de horas medidas y las reperforaciones suman 481,32 t CO_2e (6,08 % de la huella), esto orienta hacia la captura automática de los datos de maquinaria y hacia el estudio de la relación entre el terreno atravesado y los consumos. En cuanto a la inteligencia artificial, Random Forest alcanza un R^2 de 0,859 en el modelo global, pero su fiabilidad disminuye en la caja norte (R^2

0,588) y se pierde al transferir el modelo entre recintos (MAPE 149,3 %), lo que exige construir una base de datos multiobra y ensayar algoritmos y estrategias de reentrenamiento capaces de generalizar. Por último, las medidas del capítulo 6, como la reducción del 10 % del factor de emisión del hormigón (403,48 t CO_2e), son potenciales teóricos sin análisis de coste, por lo que deben verificarse en obra e integrarse con criterios económicos y de plazo, a la vez que HUELLA evoluciona de prototipo a herramienta de uso general.

Ampliación del alcance del análisis:

El estudio cuantifica los módulos A1-A5 de una unidad de obra concreta. Su extensión natural consiste en aplicar la misma metodología al resto de unidades que componen la estación —losas, pilotes, excavación y estructura— hasta obtener la huella completa del producto de construcción, y en incorporar posteriormente los módulos de uso, mantenimiento y fin de vida. Resulta de especial interés el análisis comparativo entre la pantalla concebida como elemento provisional y la pantalla incorporada a la estructura definitiva, alternativa que evita la ejecución de un segundo elemento resistente y cuyo balance ambiental no ha podido evaluarse en este trabajo.

Validación en otras obras y construcción de una base de datos multiobra:

Los resultados proceden de 133 pantallas de una sola obra. Repetir el procedimiento en otras estaciones y tipologías permitiría contrastar la representatividad de los valores obtenidos y construir progresivamente una base de datos que sirviera tanto para entrenar modelos más robustos como para establecer valores de referencia de intensidad por unidad de volumen,

hoy escasos en la literatura para pantallas ejecutadas con hidrofresa, tal como se pone de manifiesto en el apartado 5.3.1.

Tratamiento explícito de la incertidumbre

El Nivel de Certeza informa de la procedencia y la calidad de la información, pero no proporciona un intervalo probabilístico. Una línea de trabajo consiste en asociar distribuciones de probabilidad a factores y cantidades y propagar la incertidumbre mediante simulación de Monte Carlo, así como en sustituir la predicción puntual del modelo por intervalos de predicción, de modo que el resultado se comunique como rango y no como valor único.

Captura automática de la información de obra:

La preparación del inventario ha constituido la parte más costosa del trabajo. La lectura automática de albaranes y partes mediante reconocimiento óptico y modelos de lenguaje, la telemetría de la maquinaria —los sistemas de a bordo de la hidrofresa registran profundidad, verticalidad, tiempos y consumos— y la conexión con los sistemas de gestión de la obra y con los modelos BIM permitirían alimentar el inventario de forma continua y vincular cada elemento del modelo con su huella calculada.

Relación entre condiciones del terreno y consumos de ejecución:

La variabilidad del consumo de la hidrofresa y la aparición de reperforaciones dependen en buena medida de las formaciones atravesadas. Registrar la geología asociada a cada panel y correlacionarla con los consumos, el desgaste de herramienta y las desviaciones permitiría estimar los consumos de ejecución a partir del reconocimiento geotécnico previo, y reduciría la principal fuente de desviación identificada entre los escenarios *Ex ante* y el *As-built*.

Integración de los criterios de coste y plazo. El trabajo no incorpora un análisis económico, por lo que no puede afirmarse que las alternativas de menor huella sean también las de menor coste. Incorporar precios de obra al inventario permitiría calcular el coste por tonelada de CO_2e evitada de cada medida propuesta en el apartado 6.2 y plantear el problema como una optimización con varios objetivos, en la que huella, coste y plazo se evalúen conjuntamente.

Ampliación de las técnicas de aprendizaje automático:

Los resultados obtenidos con Random Forest pueden contrastarse con otros algoritmos de conjunto y con modelos lineales regularizados, incorporando además variables operativas del *As-built* a las magnitudes previstas empleadas como entrada. Merece atención específica el problema detectado en la transferencia entre recintos: estudiar procedimientos de reentrenamiento parcial que permitan aprovechar el conocimiento adquirido en una zona de la obra al iniciar otra de geometría distinta.

Verificación experimental de las medidas propuestas:

Las reducciones estimadas en el apartado 6.2 son potenciales teóricos. Convertirlos en ahorros documentados requiere campañas de medición en obra que comparen, con el mismo inventario y los mismos criterios de asignación, la ejecución con hormigones de menor factor en hormigonado sumergido, el empleo de combustibles alternativos o la electrificación de la planta de lodos, y la regeneración del lodo bentonítico. Sólo esa verificación permite pasar de una estimación de sensibilidad a una reducción acreditada.

Desarrollo y validación de la aplicación:

La aplicación HUELLA se ha concebido como prototipo para un caso de estudio. Su evolución hacia una herramienta de uso general requiere soporte multiobra y multiusuario, una batería completa de pruebas de software, una evaluación de seguridad, la conexión con fuentes externas de factores de emisión y el contraste sistemático de sus resultados con otras herramientas de cálculo disponibles en el mercado.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Adeli, H. (2001). Neural Networks in Civil Engineering: 1989–2000. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *16*(2), 126-142. https://doi.org/10.1111/0885-9507.00219

AENOR. (2006). *Gestión ambiental: Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.* (UNE-EN ISO 14040:2006).

AENOR. (2012). *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo.* (UNE-EN 15978:2012).

AENOR. (2019). *Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para cuantificación.* (UNE-EN ISO 14067).

Akinosho, T. D., Oyedele, L. O., Bilal, M., Ajayi, A. O., Delgado, M. D., Akinade, O. O., & Ahmed, A. A. (2020). Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations. *Journal of Building Engineering*, *32*, 101827. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101827

Al Nuaimi, H. S., Acquaye, A., & Mayyas, A. (2025). Machine learning applications for carbon emission estimation. *Resources, Conservation*

& Recycling Advances, *27*, 16. https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200263

Asociación Española de Normalización. (2020). *Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción* (UNE-EN 15804:2012+A2:2020). UNE. https://www.une.org/

Bai, F., Cai, Q., Zheng, X., Lei, Z., Wang, W., Liang, J., Guo, J., & Qi, J. (2025). An integrated framework for reducing construction carbon emissions using real-time monitoring and econometrics. *Scientific Reports*, *15*(1), 34188. https://doi.org/10.1038/s41598-025-15479-7

Barandica, J. M., Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Delgado, J. A., & Acosta, F. J. (2013). Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects. *Journal of Cleaner Production*, *57*, 79-91. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.036

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, *45*(1), 5-32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

British Standards Institution. (2023a). *Carbon management in buildings and infrastructure* (PAS 2080:2023). BSI Standards Limited. https://www.bsigroup.com/

British Standards Institution. (2023b). *PAS 2080:2023. Carbon management in buildings and infrastructure. BSI Standards Limited.* (PAS 2080:2023; Carbon management in buildings and infrastructure). BSI Standards Limited.

Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D. M., Wu, J., Winter, C., … Amodei, D. (2020). *Language Models are Few-Shot Learners* (arXiv:2005.14165). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165

Chen, X., Huang, M., Bai, Y., & Zhang, Q.-B. (2024). Sustainability of underground infrastructure – Part 1: Digitalisation-based carbon assessment and baseline for TBM tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *148*, 105776. https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105776

Chongxi, B., & Zhang, Z. (2024). Carbon emission quantification analysis of excavation engineering under road transport conditions. *PLOS ONE*, *19*(12), e0315765. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315765

Coyle, D. M. (2007). *Effects of payload on the fuel consumption of trucks. Department for Transport*.

Damián, R., & Zamorano, C. I. (2023). Life cycle greenhouse gases emissions from high-speed rail in Spain: The case of the Madrid–Toledo line. *Science of the Total Environment*, *901*, 166543. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166543

Delgado, O., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (s. f.). *Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 timeframe*.

Department for Energy Security and Net Zero. (2024). UK Emissions Trading Scheme (UK ETS): Non-pipeline transportation of carbon dioxide—Analytical annex. GOV.UK. (2024).

Dirección General de Carreteras. (2024a). *Orden Circular OC 3/2024 sobre cálculo de la huella de carbono (etapas de A1 a A5) de la construcción o rehabilitación de firmes* (p. 49). Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-transportes/carreteras/normativa_tecnica/11_firmes_pavimientos/oc_3-2024_huella_de_carbono_final_vi_0.pdf

Dirección General de Carreteras. (2024b). *Orden Circular OC 5/2024 sobre el sistema de clasificación RCEclass (versión 1.0)*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. https://cdn.transportes.gob.es/portal-web-transportes/carreteras/normativa_tecnica/01_normativa_general_carreteras/%2818%29_20241203_oc_5-2024_rceclass.pdf

Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo de 24 de abril de 2024 relativa a la eficiencia energética de los edificios, Irectiva (UE) 2024/1275 (2024). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32024L1275

Edelen, A., & Ingwersen, W. W. (2016). *Guidance on Data Quality Assessment for Life Cycle Inventory Data* (EPA/600/R-16/096). U.S. Environmental Protection Agency. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?LAB=NRMRL&dirEntryID=321834

European Committee for Standardization. (2022). *Sustainability of construction works—Sustainability assessment of civil engineering works—Calculation methods* (EN 17472:2022). European Committee for Standardization.

https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/7229e408-a746-43b1-aafb-1b7ff46a0c7b/en-17472-2022

Explanatory memorandum on the updated OECD definition of an AI system (OECD Artificial Intelligence Papers No. 8; OECD Artificial Intelligence Papers, Vol. 8). (2024). https://doi.org/10.1787/623da898-en

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., & Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, *91*(1), 1-21. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018

Ghoroghi, A., Rezgui, Y., Petri, I., & Beach, T. (2022). Advances in application of machine learning to life cycle assessment: A literature review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *27*(3), 433-456. https://doi.org/10.1007/s11367-022-02030-3

Guo, Y., Dong, C., Chen, Z., Zhao, S., Sun, W., He, W., Zhang, L., Wang, Y., Hu, N., & Guo, C. (2025). Evaluation of greenhouse gas emissions in subway tunnel construction. *Underground Space*, *22*, 263-279. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.12.001

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning* (segunda). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7

Hellweg, S., & Milà I Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, *344*(6188), 1109-1113. https://doi.org/10.1126/science.1248361

Huang, M. Q., Chen, X. L., Ninić, J., Bai, Y., & Zhang, Q. B. (2023). A framework for integrating embodied carbon assessment and construction feasibility in prefabricated stations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *132*, 104920. https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104920

International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework.* (ISO 14040:2006). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/37456.html

International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:20206 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines* (ISO 14044:2006). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/38498.html

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 21930:2017Sustainability in buildings and civil engineering works—Core rules for environmental product declarations of construction products and services* (ISO 21930:2017). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/61694.html

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 14067:2018 Greenhouse gases—Carbon footprint of products—Requirements and guidelines for quantification* (ISO 14067:2018). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/71206.html

International Organization for Standardization. (2019a). *ISO 14064-2:2019 Greenhouse gases—Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements* (ISO 14064-2:2019). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/66454.html

International Organization for Standardization. (2019b). *ISO 21931-2:2019 Sustainability in buildings and civil engineering works—Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic*

performance of construction works as a basis for sustainability assessment—Part 2: Civil engineering works (ISO 21931-2:2019). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/61696.html

International Organization for Standardization. (2019c). *Sustainability in buildings and civil engineering works—General principles* (ISO 15392:2019). ISO. https://www.iso.org/standard/69947.html

Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, *349*(6245), 255-260. https://doi.org/10.1126/science.aaa8415

Kortazar, A., Bueno, G., & Hoyos, D. (2023). Is high-speed rail a sustainable mobility option? A life-cycle assessment of the Basque Y project in Spain. *Environmental Impact Assessment Review*, *103*, 107276. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107276

Kortazar, A., Bueno, G., & Hoyos, D. (2024). Dataset for the life-cycle assessment of the Basque Y high-speed rail line in Spain. *Data in Brief*, *54*, 110472. https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110472

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, *60*(6), 84-90. https://doi.org/10.1145/3065386

Langroodi, A. K., Vahdatikhaki, F., & Doree, A. (2021). Activity recognition of construction equipment using fractional random forest. *Automation in Construction*, *122*, 103465. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103465

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, *521*(7553), 436-444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Levitt, R. E., & Kartam, N. A. (1990). Expert systems in construction engineering and management: State of the art. *The Knowledge Engineering Review*, *5*(2), 97-125. https://doi.org/10.1017/S0269888900005336

Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética, Ley 7/2021 62009 (2021). https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-8447

Lighthill, J. (1973). Artificial Intelligence: A General Survey. En *Artificial Intelligence: A Paper Symposium* (pp. 1-22). https://www.chilton-computing.org.uk/inf/literature/reports/lighthill_report/p001.htm

Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2008). Isolation Forest. *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining*, 413-422. https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17

Liu, M., Jia, S., & He, X. (2018). A quota-based GHG emissions quantification model for the construction of subway stations in China. *Journal of Cleaner Production*, *198*, 847-858. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.067

Liu, M., Jia, S., & Liu, X. (2019). Evaluation of mitigation potential of GHG emissions from the construction of prefabricated subway station. *Journal of Cleaner Production*, *236*, 117700. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117700

Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions*.

Macqueen, J. (1967). *SOME METHODS FOR CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF MULTIVARIATE OBSERVATIONS*.

Mao, R., Bao, Y., Duan, H., & Liu, G. (2021). Global urban subway development, construction material stocks, and embodied carbon emissions. *Humanities and Social Sciences Communications*, *8*(1), 83. https://doi.org/10.1057/s41599-021-00757-2

McCarthy, John; Minsky, Marvin L.; Rochester, Nathaniel; Shannon, Claude E. (2006). A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955. *AI Magazine*, *27*(4). https://doi.org/doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904

Mei, Y., Wang, H., & Zhou, D. (2025). Research on a Carbon Emission Prediction Model for the Construction Phase of Underground Space Engineering Based on Typical Resource Carbon Consumption and Its Application. *Buildings*, *15*(8), 1334. https://doi.org/10.3390/buildings15081334

Mei, Y., Zhou, D., Wang, H., Ke, X., Liu, Z., Tian, X., & Wang, Z. (2024). Study on carbon emission calculation during the materialization phase of subway stations and comparative analysis of carbon emissions from various construction methods. *Case Studies in Construction Materials*, *21*, e03923. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03923

Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2024). *Dirección General de Transporte por Carretera y Ferrocarril. (2024). Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera. Julio 2024. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible*.

Molaei, A., Kolu, A., Lahtinen, K., & Geimer, M. (2024). Automatic recognition of excavator working cycles using supervised learning and motion data obtained from inertial measurement units (IMUs). *Construction Robotics*, *8*(2), 14. https://doi.org/10.1007/s41693-024-00130-0

National BIM Standard—United States®. (2015). *National Institute of Building Sciences buildingSMART Alliance®*.

Olsson, J. A., Miller, S. A., & Kneifel, J. D. (2024). A review of current practice for life cycle assessment of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, *206*, 107619. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107619

Orden PCM/818/2023, de 18 de julio, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 27 de junio de 2023, por el que se aprueba el Plan de Incorporación de la Metodología BIM en la contratación pública de la Administración General del Estado y sus organismos públicos y entidades de derecho público vinculados o dependientes, BOE-A-2023-16784 105006 (2023). https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-16784

Pan, Y., & Zhang, L. (2021). Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends.

Automation in Construction, *122*, 103517. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517

Petri, I., Amin, A., Ghoroghi, A., Hodorog, A., & Rezgui, Y. (2025). Digital twins for dynamic life cycle assessment in the built environment. *Science of The Total Environment*, *993*, 179930. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179930

Plataforma Tecnológica Española de Construcción (PTEC), T. (2024). *El impacto de la Inteligencia Artificial en el sector construcción*. PTEC. https://plataformaptec.es/documentos/20241119-el-impacto-de-la-inteligencia-artificial-en-el-sector-construccion/

Rao, A. S., Radanovic, M., Liu, Y., Hu, S., Fang, Y., Khoshelham, K., Palaniswami, M., & Ngo, T. (2022). Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. *Automation in Construction*, *136*, 104099. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104099

Real Decreto 214/2025, de 18 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono y por el que se establece la obligación del cálculo de la huella de carbono y de la elaboración y publicación de planes de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, Legislation

No. 18 de marzo de 2025, Real Decreto 214/2025. Recuperado https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2025-7439

Reglamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de junio de 2020 relativo al establecimiento de un marco para facilitar las inversiones sostenibles y por el que se modifica el Reglamento (UE) 2019/2088, Reglamento (UE) 2020/852 13 (2020). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32020R0852

Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., & Li, R. Y. M. (2022). Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, *8*(1), 45. https://doi.org/10.3390/joitmc8010045

Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, *65*(6), 386-408. https://doi.org/10.1037/h0042519

Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H. S., & Girolami, M. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, *1*, e14. https://doi.org/10.1017/dce.2020.16

Sameer, H., Weber, V., Mostert, C., Bringezu, S., Fehling, E., & Wetzel, A. (2019). Environmental Assessment of Ultra-High-Performance

Concrete Using Carbon, Material, and Water Footprint. *Materials*, *12*(6), 851. https://doi.org/10.3390/ma12060851

Shen, K., Ding, L., & Wang, C. (2022). Development of a Framework to Support Whole-Life-Cycle Net-Zero-Carbon Buildings through Integration of Building Information Modelling and Digital Twins. *Buildings*, *12*(10), 1747. https://doi.org/10.3390/buildings12101747

Shinde, A. M., Dikshit, A. K., & Soni, A. (2024). Environmental life cycle assessment of underground metro rail: A case study in Mumbai Metropolitan Region, India. *Environmental Impact Assessment Review*, *106*, 107501. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107501

Soga, K., Chau, C., Nicholson, D., & Pantelidou, H. (2011). Embodied energy: Soil retaining geosystems. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *15*(4), 739-749. https://doi.org/10.1007/s12205-011-0013-7

Turing, A. M. (1950). I.—COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE. *Mind*, *LIX*(236), 433-460. https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433

Usobiaga, E., Molina-Costa, P., Ispizua, B., & Izkara, J. L. (2025). Barriers to the Effective Implementation of AI in Predicting Public Works. *Street Art & Urban Creativity*, *11*(7), 201-219. https://doi.org/10.62161/sauc.v11.5978

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). *Attention Is All You Need* (arXiv:1706.03762). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(9), 1218-1230. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8

Widjaja, D. D., & Kim, S. (2025). Intelligent Rebar Optimization Framework for Urban Transit Infrastructure: A Case Study of a Diaphragm Wall in a Singapore Mass Rapid Transit Station. *Smart Cities*, *8*(4), 130. https://doi.org/10.3390/smartcities8040130

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press. https://digitallibrary.un.org/record/139811

Zou, T., Li, C., Lei, H., & Zhang, G. (2025). Dynamic BIM-based digital twin for lifecycle estimation of infrastructure embodied carbon. En C.-Q. Li & D. M. Frangopol, *Life-Cycle Performance of Structures and*

Infrastructure Systems in Diverse Environments (1.ª ed., pp. 439-445).

CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003595120-53

ANEXOS

ANEXO 1. ACCESO A DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA

Con el fin de reforzar la trazabilidad y reproducibilidad de los datos y cálculos desarrollados en el presente trabajo, se facilita un enlace de acceso a la documentación complementaria empleada en el caso de estudio.

La carpeta contiene los siguientes archivos:

- **INVENTARIO_ACV_HUELLA.xlsx:** inventario utilizado para la recopilación, estructuración y cálculo de la huella de carbono de los elementos analizados.
- **Vídeo explicativo de la aplicación HUELLA**: demostración de las principales funcionalidades de la versión v6.0 Fase 2 REV25 del prototipo desarrollado, incluyendo la gestión del inventario, el cálculo de emisiones, la consulta, la comparación de resultados y los módulos de análisis incorporados.

Enlace de acceso: [Enlace descarga]

https://drive.google.com/drive/folders/13-DFCw8Ki1gUbtMgV_FnfdwOuWt3JN32?usp=sharing

ANEXO 2. DECLARACIÓN DE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y HERRAMIENTAS DIGITALES DE APOYO

En la elaboración del presente Trabajo Fin de Máster se han utilizado herramientas de inteligencia artificial y herramientas digitales complementarias como apoyo en determinadas tareas de programación, traducción y gestión bibliográfica. Su empleo ha tenido carácter auxiliar, manteniéndose la responsabilidad de la autora sobre todo el contenido final del trabajo. A continuación, se indica el uso realizado de cada herramienta:

ChatGPT (OpenAI)

Apoyo en la traducción del inglés al español de textos.

Apoyo en las asignaciones y comprobaciones del inventario.

Escritura de líneas de código de la aplicación HUELLA. Asistencia en la programación, depuración de líneas y revisión de arquitectura.

Apoyo en la implementación mediante librerías Python de técnicas de inteligencia artificial en la aplicación Huella.

Claude (Anthropic)

Revisión puntual de la aplicación HUELLA.

Zotero

Gestión de bibliografía y referencias. Se ha utilizado Zotero para almacenar, clasificar y organizar las fuentes bibliográficas consultadas, insertar citas durante la redacción y generar la bibliografía final conforme al estilo bibliográfico adoptado en el TFM.

En consecuencia, el uso de estas herramientas se ha realizado con una finalidad de apoyo puntual durante el desarrollo del trabajo.