Universidad Europea

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SERIE: INNOVACIÓN EDUCATIVA

Análisis de viabilidad en la implementación de la metodología BIM en las dimensiones de sostenibilidad (6D) y mantenimiento (7D) de infraestructuras en el sector del agua

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Pedro Isidro Olmos

Dirigida por:

D. Pedro Gerardo Blázquez García
D. Marcos Rodríguez Serrano
D. Carlos Henche Guijarro

Madrid, 2026

AGRADECIMIENTOS

“Tenemos que saber lo que todavía no sabemos y deberíamos saber”

RESUMEN

La digitalización del sector del agua es uno de los grandes impulsos tanto técnico como económico que se está desarrollando en los últimos años con la implementación de nuevas tecnologías y procedimientos como son la metodología BIM. Este Trabajo Fin de Máster ahonda en la necesidad de conocer más como puede convivir la metodología BIM, ligada frecuentemente a la parte más constructiva y de proyecto, a una convivencia durante todo el ciclo de vida de la infraestructura.

Para ello se comenzará estableciendo unos objetivos, los cuales pretenden conectar la metodología BIM con los sistemas de gestión de mantenimiento de los activos (GMAO) y ser capaz de determinar el impacto medioambiental de los trabajos realizados en dicho mantenimiento a través del cálculo de los gases de efecto invernadero (GEI). Todo ello con un elemento común, un sistema de información geográfica que conecte todos los puntos. Este objetivo tendrá que ser viable, por lo que al final del trabajo tendrá que concluir con un análisis de viabilidad para determinar si la propuesta desarrollada es viable.

Una vez establecidos los objetivos, se empezará estudiando el contexto que se vive actualmente con el estado de las redes de abastecimiento, la influencia que se ha comentado de la digitalización del sector del agua y si otros entes u organismos tienen experiencias parecidas a las que se desarrollan en esta investigación sobre conectar GIS-BIM-GMAO-Sostenibilidad (o GEI).

Después comienza el estudio del estado del arte, donde se revisarán las Normas que actualmente rigen la gestión de activos, la metodología BIM y la determinación de los gases de efecto invernadero. También se revisarán las novedades con la normativa en metodología BIM propuesta por el BSI y si dichas propuestas son compatibles con el trabajo que aquí se desarrolla. Por último, se revisarán las guías con mayor relevancia para el establecimiento de planes de mantenimiento en las redes de abastecimiento.

Acto seguido se definirán las necesidades de porque desarrollar está investigación y se procederá al desarrollo de la metodología. La metodología se desarrolla en cinco fases en las cuales se reconoce el lugar donde se quiere aplicar la metodología y si dispone de la información suficiente, por si no es así, realizar una comprobación y toma de datos en campo. A continuación se definirá la estrategia de implementación de la metodología BIM, desarrollando los diferentes requisitos de información (OIM, AIM, EIR…). Después se darán unas pautas para la elaboración de los planes de

mantenimiento en función de las infraestructuras o elementos de la red encontrados. Se definirán unos trabajos por cada plan de mantenimiento y estos serán inventariados para localizar sus emisiones y poder elaborar una relación de emisión de gases de efecto invernadero.

Una vez establecida la metodología, se seleccionará un municipio mediante un análisis multicriterio (AHP) y se aplicará la metodología desarrollada en el apartado anterior.

Una vez aplicada la metodología, se tendrán en cuenta los tiempos invertidos y el personal asociado a esos tiempos para valorar económicamente el coste de la implementación de la metodología y poder elaborar un gráfico de toma de decisión para plantear la viabilidad del método.

Finalmente, la investigación se cerrará con unas conclusiones y futuras líneas de investigación observadas durante la realización de toda la investigación.

ABSTRACT

The digitalization of the water sector represents one of the major technical and economic drivers emerging in recent years through the implementation of new technologies and workflows, such as Building Information Modeling (BIM). This Master's Thesis delves into the need to better understand how BIM—often associated predominantly with design and construction phases—can extend its applicability across the entire lifecycle of water infrastructure.

To achieve this, the work begins by defining key objectives aimed at bridging BIM methodology with Computerized Maintenance Management Systems (CMMS/GMAO) and assessing the environmental footprint of maintenance activities by calculating greenhouse gas (GHG) emissions. All of this is underpinned by a common denominator: a Geographic Information System (GIS) that interconnects all components. Because technical feasibility is essential, the thesis culminates in a feasibility analysis to evaluate whether the proposed framework is viable.

Once the objectives are established, the study analyzes the current state of water distribution networks, the aforementioned impact of digitalization in the water industry, and whether other organizations have reported similar initiatives linking GIS, BIM, CMMS, and sustainability (or GHG accounting).

The literature review follows, examining current international standards governing asset management, BIM methodology, and greenhouse gas quantification. It also reviews recent updates in BIM standards proposed by the BSI to evaluate their compatibility with the workflow developed herein. Finally, key industry guidelines relevant to formulating maintenance plans for water supply networks are surveyed.

Next, the rationale for this research is articulated, leading directly into the development of the methodology. The framework is structured across five stages: site identification and data adequacy verification (including field inspections and data collection where gaps exist); formulation of the BIM implementation strategy, detailing specific information requirements (OIR, AIR, EIR, etc.); provision of guidelines for drafting maintenance plans tailored to the surveyed network assets and infrastructure; and the task-level breakdown of maintenance activities, which are inventoried to trace operational emissions and compile an inventory of greenhouse gas emissions.

Once the methodology is defined, a municipality is selected using an Analytical Hierarchy Process (AHP) multi-criteria decision analysis, and the developed framework is applied to the case study.

Following its application, labor hours and associated personnel resources are evaluated to assess the economic cost of deploying the methodology, resulting in a decision-making matrix to evaluate the overall feasibility of the approach.

Finally, the thesis concludes with key findings and outlines future lines of research identified throughout the study.

ÍNDICE

1. OBJETIVOS, ALCANCE Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO 1

1.1. Objetivos generales 1

1.2. Objetivos específicos 1

1.3. Alcance de la investigación 2

1.4. Limitaciones del estudio 3

2. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO 5

2.1. Inventario de las infraestructuras hidráulicas en España 6

2.2. Contratos de explotación de infraestructuras hidráulicas en España 7

2.3. Gestión de activos de infraestructuras hidráulicas. 10

2.4. Sostenibilidad en la explotación de infraestructuras hidráulicas 13

2.5. Metodología BIM en el Sector del Agua. Licitaciones con metodología BIM para la conservación de infraestructuras (Gestión de activos) 15

2.6. Casos prácticos de aplicación de metodología BIM en entornos con GMAO o Sostenibilidad. 18

3. ESTADO DEL ARTE 21

3.1. Gestión de activos 21

3.1.1. Familia de las ISO 55000 21

3.2. Metodología BIM 24

3.3. Mantenimiento de infraestructuras hidráulicas 30

3.4. Sostenibilidad de los activos 42

4. IDENTIFICACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD 49

4.1. Identificación de las necesidades 49

4.2. Justificación de la necesidad 50

5. PROPUESTA METODOLÓGICA 51

5.1. Fase I: Inventario de la red 51

5.2. Fase II: Definición Estratégica (ISO 19650-1) 56

5.3. Fase III: Incorporación y establecimiento de los planes de mantenimiento a los activos 73

5.4. Fase IV: Inventario y cálculo de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).... 75

5.5. Fase V: Desarrollo y despliegue de la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI..... 84

6. CASO DE ESTUDIO 103

6.1. Elección del caso de estudio y justificación 103

6.2. Aplicación de la metodología propuesta 117

7. ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA 175

7.1. Establecimiento de los precios unitarios de los recursos empleados..... 176

7.2. Evaluación de recursos y costes por fases de la metodología desarrollada 177

7.3. Definición del criterio de viabilidad 192

7.4. Gráfico para la toma de decisiones..... 193

7.5. Discusión 195

1. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO 197

1.1. Conclusiones 197

1.2. Futuras líneas de trabajo 198

1.3. Reflexión sobre el trabajo 198

REFERENCIAS.....200

ANEXO 1. CONVERSOR IFC-GEOJSON 203

ANEXO 2. ARCHIVO IDS DE VALIDACIÓN DE METADATOS IFC 207

ANEXO 3. ACRONIMOS PARA EL NOMBRADO DE FICHEROS EN EL CDE 210

FIGURAS

Figura 1. Infografía del inventario de infraestructuras hidráulicas de España a 2025. Fuente: DAQUAS, 2025 7

Figura 2. Evolución de las licitaciones anuales de explotación de infraestructuras hidráulicas (periodo 2011-2025). Fuentes: Ministerio de Hacienda, 2026; MITECO, 2023; CIBIM, 2023; SEOPAN, 2025 9

Figura 3. Mapa con la Relación de presupuesto licitado frente a número de contratos licitados por Comunidades Autónomas en el periodo 2010-2025. Fuentes: MITECO, 2023; Ministerio de Hacienda, 2026; Agencia Catalana del Agua, 2025, Canal de Isabel II, 2025; ESPAR, 2024 9

Figura 4. Sistema INFRAPORT para el registro y localización de fugas. Fuente: vonRoll hydro..... 11

Figura 5. Gemelo digital de una estación de bombeo de aguas residuales. Fuente: AEAS, 2026.... 12

Figura 6. Riesgo actual de sequía global y sus componentes. Fuente: IPCC (2022)..... 14

Figura 7. Datos cuantitativos generales con objeto del contrato Mantenimiento del cuadro de mando del Observatorio BIM. Fuente: Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2026 ... 16

Figura 8. Ciclo de vida de la gestión de información genérica de proyectos y activos. Fuente: AENOR (2019)..... 22

Figura 9. Relación entre los elementos clave de un sistema de gestión de activos. Fuente: AENOR, 2020..... 24

Figura 10. Esquema de actividades dentro de la fase de operación. OpenBIM..... 30

Figura 11. Formato recomendado para declaración consolidada de emisiones GEI, AENOR, 2019 44

Figura 12. Etapas del ciclo de vida - ANEFHOP, 2022 45

Figura 13. Editor de mapas de valores de QField. QField..... 52

Figura 14. Captura de pantalla de una válvula en la que se observa la clasificación de AEAS. Elaboración propia 58

Figura 15. Portada de certificado DAP con el código de registro único. GlobalEPD AENOR 61

Figura 16. Diferencias de formato y estructura de ficheros con formato propietario (.rfc izquierda) e IFC (derecha). Ep..... 62

Figura 17. Ejemplo de la creación de Pset personalizados mediante la herramienta IfcOpenShell. Elaboración propia 63

Figura 18. Metadatos de la ubicación (Cota, Latitud y Longitud en el SRC WGS84). Elaboración propia 63

Figura 19. Error IFCMEASUREWITHOUNIT en el programa BIMvision con un archivo no revisado. 65

Figura 20. Reporte del informe de validación IDS propuesto para comprobar los ficheros IFC. Elaboración propia 67

Figura 21. Ejemplo del esquema del fichero para establecer los planes de mantenimiento. Elaboración propia 74

Figura 22. Primeras iteraciones con Leaflet y Gemini. Elaboración propia 84

Figura 23. Banner con funciones para agregar o quitar operaciones del plan de mantenimiento definido en el fichero javascript. Elaboración propia 85

Figura 24. Intento de interpretación de archivo IFC, cuando en realidad es un código embebido por la propia web. Elaboración propia..... 86

Figura 25. Banner con pestaña de huella de carbono configurado por Gemini. Elaboración propia. 86

Figura 26. Herramienta Duración del trayecto de 2 horas en coche en Google Maps. Elaboración propia 104

Figura 27. Municipios resultantes con el filtro de superficie entre 25 y 30 hectáreas. Elaboración propia 105

Figura 28. Municipios y estado de la información sobre la red de abastecimiento. Elaboración propia 106

Figura 29. Mapa con los municipios resultantes con toda la información en el Planeamiento de la red de abastecimiento. Elaboración propia 107

Figura 30. Plano de la red de abastecimiento incluido en las Normas Subsidiaras de Maderuelo. Visor Planeamiento CYL..... 118

Figura 31. Límites del municipio de Maderuelo. Elaboración propia..... 119

Figura 32. Uno de los 3 puntos de georreferenciación. Elaboración propia 120

Figura 33. Resultado en la zona del punto expuesto. Georrefenciación. Elaboración propia..... 120

Figura 34. Resultado general de la georreferenciación. Elaboración propia..... 121

Figura 35. Estructura de las entidades digitalizadas. Elaboración propia 121

Figura 36. Estructura de campos en varias entidades digitalizadas 122

Figura 37. Vectorización de la red de distribución representada en los planos de las NNSS. Elaboración propia 123

Figura 38. Configuración desde QGIS con QFieldSync para exportar a QField y visualizar en el dispositivo móvil. Elaboración propia 124

Figura 39. Proceso de toma de datos en campo con dispositivo móvil a través de la aplicación QField, exportación y comprobación en gabinete con QGIS de la actualización. Elaboración propia 127

Figura 40. Captura de pantalla en la que se comprueba que la codificación del Depósito es correcta. Elaboración propia 130

Figura 41. Referencias a las guías de operación y mantenimiento de una válvula procedente del IFC. Elaboración propia..... 132

Figura 42. Comprobación de los booleanos en los campos de QualityLevelEF y QualityDataEF para no poder introducir otros valores. Elaboración propia 133

Figura 43. Comprobación de los Pset, valores y características con el fichero IDS de varios ficheros IFC. Elaboración propia..... 138

Figura 44. Viabilidad de la implementación de la metodología desarrollada en la Investigación. Elaboración propia 194

TABLAS

Tabla 1. Relación con la frecuencia de inspección de Depósitos en diferentes países. Fuente: Elaboración propia 33

Tabla 2. Relación con la frecuencia de campañas de localización de fugas en diferentes países. Fuente: Elaboración propia 36

Tabla 3. Relación con la frecuencia de revisión de válvulas en diferentes países. Fuente: Elaboración propia 39

Tabla 4. Relación con la frecuencia de revisión de ventosas en diferentes países. Fuente: Elaboración propia 42

Tabla 5. Esquema de datos de los archivos GeoJSON necesarios para la incorporación al CDE. Elaboración propia 53

Tabla 6. Estructura de los datos ambientales exigida. Elaboración propia 59

Tabla 7. Matriz de ejemplo de mapeo semántico 64

Tabla 8. Tabla a completar con roles y responsabilidades. Elaboración propia 69

Tabla 9. Estado de los modelos. CDE. Elaboración propia..... 69

Tabla 10. Tabla a rellenar con estructura de carpetas. CDE. Elaboración propia 70

Tabla 11. Permisos establecidos en el CDE..... 71

Tabla 12. Descripción de la categoría y el enfoque según el responsable. Elaboración propia 76

Tabla 13. Potenciales de calentamiento global según el IPCC AR5. Elaboración propia 78

Tabla 14. Unidades declaradas o funcionales. Elaboración propia 79

Tabla 15. Equivalencia entre la evaluación y gestión de la incertidumbre. Elaboración propia 81

Tabla 16. Municipios con información completa en el Planeamiento de la red de distribución. Elaboración propia 106

Tabla 17. Tabla de muestreo con las propiedades por cada municipio. Elaboración propia 110

Tabla 18. Jerarquía y naturaleza de las variables para análisis AHP. Elaboración propia 111

Tabla 19. Límites para normalización de variables. Método AHP. Elaboración propia..... 112

Tabla 20. Matriz de variables normalizadas. Método AHP. Elaboración propia..... 112

Tabla 21. Matriz de pesos. Método AHP. Elaboración propia 114

Tabla 22. Matriz para la obtenicón de vector de pesos y CR. Método AHP. Elaboración propia ... 114

Tabla 23: Valores de la consistencia aleatoria en función del tamaño de la matriz [J. Anzar & F. Guijarro] ... 115

Tabla 24. Matriz de puntuaciones por municipio. Método AHP. Elaboración propia ... 116

Tabla 25. Codificación de los identificadores activos de los elementos del modelo. Elaboración propia ... 129

Tabla 26. Codificación de los Pset para la integración de la codificación de AEAS. Elaboración propia ... 130

Tabla 27. Relación de parámetros de mantenimiento y operación a incluir en los modelos incorporados. Elaboración propia ... 131

Tabla 28. Relación de parámetros de sostenibilidad a incluir en los modelos incorporados. Elaboración propia ... 133

Tabla 29. Matriz de mapeo semántico ... 134

Tabla 30. Roles y responsabilidad en el CDE. Elaboración propia ... 139

Tabla 31. Clasificación de estado de los modelos en el CDE. Elaboración propia ... 140

Tabla 32. Estructura de carpetas del CDE. Elaboración propia... 140

Tabla 33. Características y reglas a cumplir para el nombrado de ficheros en el CDE. Elaboración propia ... 141

Tabla 34. Permisos establecidos en el CDE... 142

Tabla 35. Características de la red de distribución de Maderuelo a probar. Elaboración propia... 145

Tabla 36. Inventario de equipos móviles, maquinaria. Consumos y combustibles empleados. Elaboración propia ... 156

Tabla 37. Tipología de emisiones GEI por tipo de combustible. Elaboración propia ... 157

Tabla 38. Obtención de la cantidad de emisiones GEI por tipo de gas y combustible. Elaboración propia ... 157

Tabla 39. Obtención de la cantidad de emisiones GEI por tipo de gas y aceite. Elaboración propia ... 158

Tabla 40. Unidades declaradas de los materiales. Elaboración propia ... 158

Tabla 41. Identificación de los módulos que declarar en función del material. Elaboración propia ... 159

Tabla 42. Relación de materiales, fuente de datos, calidad de la fuente, módulos aplicados y GWP. Elaboración propia 160

Tabla 43. Matriz de intercambio entre módulos y gases emitidos con categorías del Anexo F de la norma UNE EN 14064-1:2019. Elaboración propia 163

Tabla 44. Relación de emisiones por Categoría pormenorizada y plan de mantenimiento asociado. Elaboración propia 171

Tabla 45. Precios unitarios de los recursos empleados. Elaboración propia..... 176

Tabla 46. Coste total desglosado de Alternativa 1. Alternativa con recursos comerciales. Elaboración propia 191

Tabla 47. Coste total desglosado de Alternativa 2. Alternativa con la metodología propuesta. Elaboración propia 191

1. OBJETIVOS, ALCANCE Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

1.1. Objetivos generales

Desarrollar y validar un marco metodológico integral, soportado por herramientas de acceso abierto, que conecte la gestión de la información (BIM) de infraestructuras hidráulicas con los sistemas de mantenimiento (GMAO) y la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), para optimizar la toma de decisiones operativas y medioambientales en el ciclo del agua.

Valorar la viabilidad de dicho proceso, generando un gráfico en el cual se pueda tomar la decisión en función de los recursos económicos y humanos de una empresa que quiera optar por una licitación en la fase de operación mediante Metodología BIM.

1.2. Objetivos específicos

1) Analizar la normativa existente y propuestas futuras, guías y recomendaciones respecto a la gestión de activos (ISO 55000) y aplicación de la metodología BIM (ISO 19500) respecto a la gestión de activos durante todo el ciclo de vida útil de los elementos que componen una infraestructura civil con el objetivo de establecer un método de trabajo para la gestión y explotación de una red de abastecimiento de agua existente.

2) Analizar las diferentes guías y recomendaciones existentes redactadas en los países que son referencia en explotación en redes de abastecimiento de agua potable en el mundo, comparando los planes de mantenimiento y las diferentes tareas que los componen con el fin de tener una base de tareas que establecer en el mantenimiento de una red de abastecimiento de agua.

3) Analizar la normativa existente, guías y recomendaciones respecto a la gestión de la sostenibilidad de los activos, centrados en el cálculo de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (ISO 14060), lo cual permita establecer un procedimiento de cálculo para determinar la emisión de GEI en las diferentes tareas de mantenimiento de una red de abastecimiento de agua.

4) Diseñar un método o procedimiento de trabajo que aúne la gestión de activos con la aplicación de la metodología BIM de los elementos que componen una red de distribución de agua, con las tareas a realizar en un plan de mantenimiento distinguiéndose por el tipo de elemento que pertenece a la red de abastecimiento, valorando y cuantificando la emisión de GEI de todas las tareas asociadas a los distintos planes de mantenimiento.

5) Poner a prueba el método de trabajo mediante la aplicación en una red de distribución de pequeña entidad para valorar en tiempo y recursos todos los pasos seguidos en el método puesto a prueba, implementando una aplicación informática que combine todo el procedimiento para facilitar la implementación y uso del método de trabajo propuesto.

6) Obtener una relación de los recursos y tiempos empleados para la elaboración del caso práctico en función del tamaño y estado de la red de distribución. Extrapolar dicha relación para estimar la cantidad de recursos a emplear en redes de distribución de aguas de mayores dimensiones, en función del tamaño y la densidad de población.

1.3. Alcance de la investigación

El alcance de este trabajo abarca el desarrollo teórico, la formulación metodológica y la validación tecnológica de un flujo de trabajo que integra la metodología BIM, la gestión de activos (GMAO) y el cálculo de la huella de carbono (GEI) en el sector del agua. Específicamente, la investigación se circunscribe a las siguientes áreas:

- **Ámbito Normativo y Metodológico**: El trabajo se alinea con la serie de normas UNE-EN ISO 19650 (incluyendo la adaptación a los borradores de revisión del BSI de 2026), el estándar de datos IFC4x3 y las normativas ambientales ISO 14064-1 e ISO 14067 aplicadas a huella de carbono. La taxonomía de activos se limitará a la propuesta en las guías de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS).

- **Desarrollo Tecnológico**: Se incluye el diseño y la programación de una arquitectura de software puente (prueba de concepto) basada en tecnologías de código abierto e interfaces web de programación (APIs). Esto comprende la extracción de datos mediante IfcOpenShell, su transformación a formato espacial (GeoJSON) y su despliegue en un visor web interactivo (Leaflet) para su vinculación con plataformas GMAO.

- **Caso de Estudio Práctico:** La validación empírica de la metodología se acota a infraestructuras de almacenamiento y distribución de agua potable, aplicando el flujo de trabajo de forma íntegra sobre el piloto del Depósito Maderuelo y sus elementos de valvulería y red anexos.

- **Cálculo de Emisiones:** La cuantificación de Gases de Efecto Invernadero se centrará exclusivamente en los Alcances 2 (consumos energéticos derivados de la operación) y 3 (emisiones indirectas asociadas a la extracción, fabricación y transporte de los materiales constructivos, así como a las intervenciones de mantenimiento).

1.4. Limitaciones del estudio

Por restricciones de tiempo, recursos computacionales y naturaleza del proyecto, la investigación asume las siguientes limitaciones, las cuales quedan expresamente fuera del alcance del documento:

- **Desarrollo de Software GMAO Completo**:

La investigación no tiene como objetivo programar un software GMAO comercial desde cero. El esfuerzo tecnológico se centra en la interfaz de comunicación (el visor web GIS/BIM y el script de extracción ETL) que actúa como pasarela de datos hacia bases relacionales preexistentes.

- **Alcance de las Dimensiones BIM:**

El modelado del caso de estudio se centrará estrictamente en los requerimientos geométricos y de información necesarios para la fase de Operación y Mantenimiento (AIM), habitualmente denominadas dimensiones 6D (Sostenibilidad) y 7D (Gestión del ciclo de vida). Quedan excluidas de este estudio las simulaciones de fases de construcción (4D) o la estimación de costes de ejecución material de la obra (5D).

- Profundidad del Inventario de Ciclo de Vida (ICV):

Para el cálculo de la huella de carbono, el estudio no realizará análisis primarios de laboratorio ni auditorías industriales directas para calcular las emisiones de fabricación de los materiales. Los

cálculos se apoyarán en Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) existentes de tipo III o, en su defecto, en factores de emisión secundarios extraídos de bases de datos estandarizadas (e.g., MITECO o Ecoinvent).

- **Tipología de Infraestructuras:**

Quedan excluidas de la validación práctica las Estaciones de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) y las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). Debido a la complejidad de las emisiones directas (Alcance 1) de procesos biológicos y químicos (como las emisiones de óxido nitroso o metano), su integración requeriría un marco metodológico paralelo que excede los objetivos de este documento.

2. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

Uno de los recursos más preciados en el mundo, por no decir el más codiciado, el agua, es una pieza vital en el desarrollo de la humanidad. Gracias a los avances en la ingeniería desde Vitruvio en el Imperio Romano, pasando por el avance de la Ingeniería Hidráulica con la figura de Manuel Lorenzo Pardo (*CEDEX, 2023*) hasta la actualidad, nos permiten hacer de la sustancia líquida en un recurso gestionable, con menor o mayor eficiencia, para el beneficio de todos los habitantes de la Tierra.

El cambio climático ya no es una visión futura, ahora es una realidad que influye en los ciclos hidrológicos e intensifica el estrés hídrico *(IPCC, 2022)*. El sector de la ingeniería hidráulica necesita hacer más que solo garantizar el suministro básico de agua y saneamiento; debe trabajar bajo estrictas medidas de sostenibilidad, estar alineado con el nexo agua-energía y reducir la huella de carbono para cumplir con los estándares de eficiencia en agua y energía.

Para lograr esta eficiencia, las administraciones públicas han encontrado en la digitalización un motor de transformación sectorial. A nivel regional y nacional, las políticas de contratación pública están impulsando una transición obligatoria hacia entornos colaborativos. Por ejemplo, la exigencia de la metodología BIM (Building Information Modeling) en las especificaciones de licitación se está implementando a un ritmo acelerado (*MITMA, 2023)*. Estas regulaciones erradicarán antiguos problemas de obras civiles, como sobrecostos y brechas en los plazos, elevando así el estándar de los requisitos técnicos para todos los involucrados en el ciclo del agua.

A pesar de este impulso legal, la realidad técnica del sector hidráulico es muy diferente a la de la construcción convencional. Las plantas de tratamiento y las redes de transporte se caracterizan por geometrías de fluidos complejas, dinámicas físico-químicas continuas y una gran extensión territorial. Históricamente, esta complejidad ha llevado a que la información técnica se gestione de manera fragmentada y se pierda información vital en la transferencia entre las fases de diseño, construcción y operación. Con una gran proporción de activos hidráulicos envejeciendo y necesitando ser mantenidos, además de los altos costos de mantenimiento, los modelos de ingeniería y los sistemas de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador o GMAO no están integrados, y por lo tanto, los gestores no pueden desempeñarse de manera efectiva.

La necesidad técnica de la metodología BIM trata de radicar en esta brecha. Además de su valor como herramienta de modelado 3D, los estándares internacionales como la serie ISO 19650 la

caracterizan como un sistema estructurado de gestión del conocimiento para todo el ciclo de vida del activo. Al presentar datos geométricos y alfanuméricos desde las primeras etapas del proyecto, BIM se convierte en una base técnica crítica para el desarrollo de Gemelos Digitales. Así, la incorporación de BIM en infraestructuras hidráulicas no puede ser solo un ejercicio de cumplimiento normativo, sino una estrategia crucial para vincular el diseño con la operación a largo plazo del agua para mantener su resiliencia y sostenibilidad.

2.1. Inventario de las infraestructuras hidráulicas en España

El patrimonio de infraestructuras hidráulicas en España con 3188 presas y grandes embalses (*MITECO, 2024*), 1640 plantas de tratamiento de agua potable ETAP (*DAQUAS, 2025*), 29 mil depósitos de almacenamiento de agua potable (*DAQUAS, 2025*), 250 mil kilómetros de conducciones destinadas al abastecimiento (*DAQUAS, 2025*) y 165 mil kilómetros de colectores (*iAgua, 2018*) es uno de los más extensos de Europa, diseñado para mitigar la irregularidad climática y la escasez de agua.

Tal dimensión de patrimonio también implica una elevada edad media de las infraestructuras a nivel general debido a la larga tradición de ingeniería hidráulica que tiene España y que hace que, en el caso de infraestructuras críticas se haya ejercido un mantenimiento adecuado, prolongando su vida útil por encima de lo diseñado. En el caso de otras infraestructuras no tan críticas, sí que preocupa la elevada edad ya que, sin un mantenimiento adecuado, tienen riesgos de sufrir fallos o roturas que puedan hacer inoperable el activo.

Las grandes presas (*MITECO, 2024; SEOPAN, 2025*) superan los 50-60 años media debido al auge de construcción entre los años 1950 y 1980. La mayor parte de la capacidad de almacenamiento y regulación del país depende ahora de estas presas. En cuanto a las plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual, la edad media no es elevada (15-25 años) ya que el desarrollo de estas instalaciones no vio su expansión hasta los años 90 a través de varias directivas de saneamiento de la Unión Europea. Dado que los requisitos para el tratamiento tanto de las aguas para consumo como de las aguas residuales son más estrictos, estas plantas de los años 90 tendrán que ampliarse o reformarse para cumplir con las nuevas directrices.

En cuanto a las redes de abastecimiento y colectores su edad media se encuentra entre los 30-40 años (*TecnoAqua, 2022; Garrido et al., 2026*), cerca del final de su vida útil (50 años). La no

renovación de estas instalaciones implica pérdidas de agua no registradas en la red de abastecimiento y problemas de estabilidad del terreno y de vertidos al medio natural de los colectores.

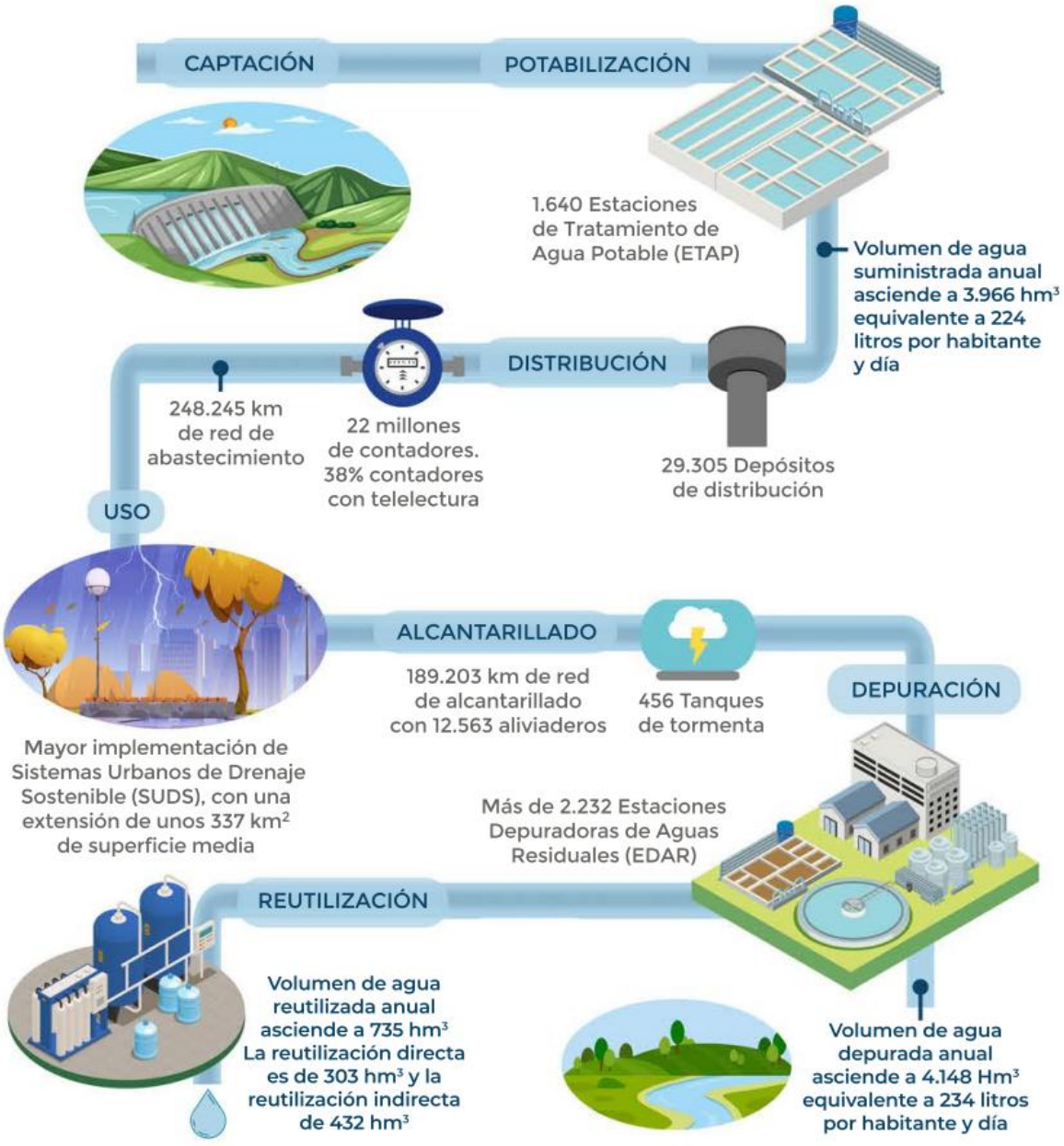


Figura 1. Infografía del inventario de infraestructuras hidráulicas de España a 2025. Fuente: DAQUAS, 2025

2.2. Contratos de explotación de infraestructuras hidráulicas en España

La gestión, mantenimiento y conservación del ciclo del agua en España es un sector estratégico impulsado por la descentralización de responsabilidades por parte de las Administraciones. Ya sea

con un modelo público centralizado como puede ser el Canal de Isabel II, operador del ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid; un modelo público en forma de sociedad en la que concurran varios municipios como una Mancomunidad, siendo este el caso de Añarbe Urak Aguas, el operador de diversos municipios en torno a Donostia/San Sebastián y de la propia Donostia; o con un modelo privado como pueda ser la antigua Agbar (Aguas de Barcelona) y que actualmente está bajo el paraguas de la empresa Veolia.

Las empresas de gestión pública ya sean centralizadas o en forma de sociedad, licitan los servicios a través de contratos de explotación de infraestructuras. De igual manera, estamentos de mayor relevancia como las Confederaciones Hidrográficas en España también dependen de la licitación de contratos de obra y servicios para la explotación de las infraestructuras de las que son gestores.

El conjunto de los contratos públicos para la conservación y mantenimiento hidráulico en España en los últimos 15 años se estima en 22 mil millones de euros según la Plataforma de Contratación del Sector Público *(Ministerio de Hacienda, 2026)*, ofertándose anualmente entre 400 y 650 licitaciones en contratos para la explotación.

En un contexto nacional, la inversión en este tipo de licitaciones se ha visto mermada desde el periodo 2011-2015 debido a los ajustes presupuestarios realizados a raíz de la crisis económica global del año 2008. Esto ha llevado a arrastrar un déficit estructural en inversiones para el mantenimiento y mejora de las infraestructuras ya existentes en ese periodo.

En el último periodo, 2020-2026, debido a la fuerte inyección presupuestaria de los fondos NextGenerationEU por parte de la Unión Europea adaptado a España como el Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (MRR), y con el impulso por parte del Estado de los Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE), ambos motivados por la crisis del COVID 2019, se han destinado cerca de 10 mil millones de euros para mejoras de infraestructuras y digitalización del ciclo integral del agua.

En este último punto el motivo por el cual empiezan a aparecer licitaciones en las que se incluye el empleo de metodología BIM, sin una gran definición y con poco grado de desarrollo, para los contratos de explotación y conservación de infraestructuras en el sector del agua.

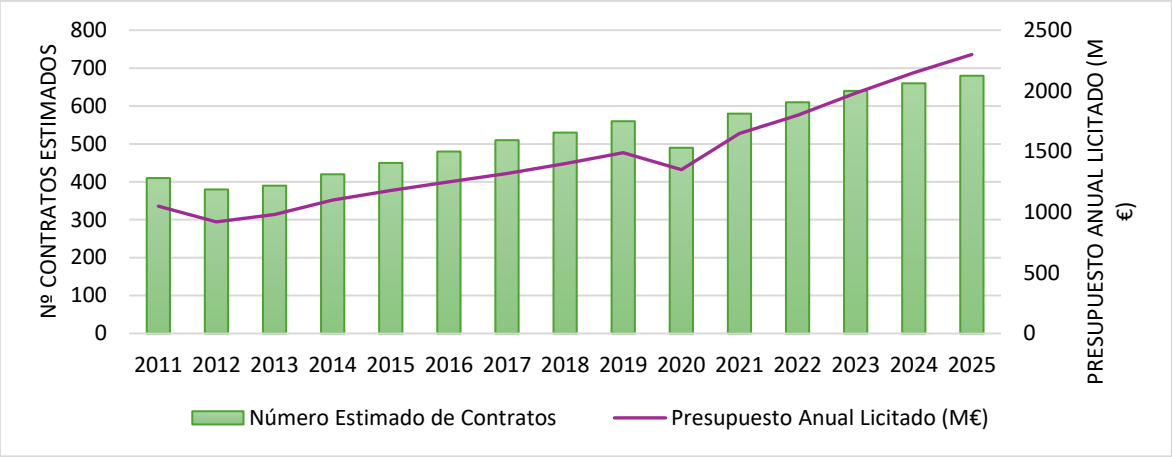


Figura 2. Evolución de las licitaciones anuales de explotación de infraestructuras hidráulicas (periodo 2011-2025). Fuentes: Ministerio de Hacienda, 2026; MITECO, 2023; CIBIM, 2023; SEOPAN, 2025

En un contexto regional, la distribución del número de contratos licitados en el periodo 2011-2025 varía entre autonomías siguiendo una proporción en relación con la población que habita, siendo Andalucía la que mayor número de contratos tiene (2100) y la que mayor presupuesto dedica (4200 millones de euros) y La Rioja la que menor repercusión tiene tanto en número de licitaciones (180) como de presupuesto licitado (150 millones de euros). Un caso particular es la Comunidad de Madrid, la cual licitó 950 contratos con un presupuesto total de 3500 millones de euros, lo que la convierte en la región con mayor presupuesto de licitación por contrato en el periodo consultado.

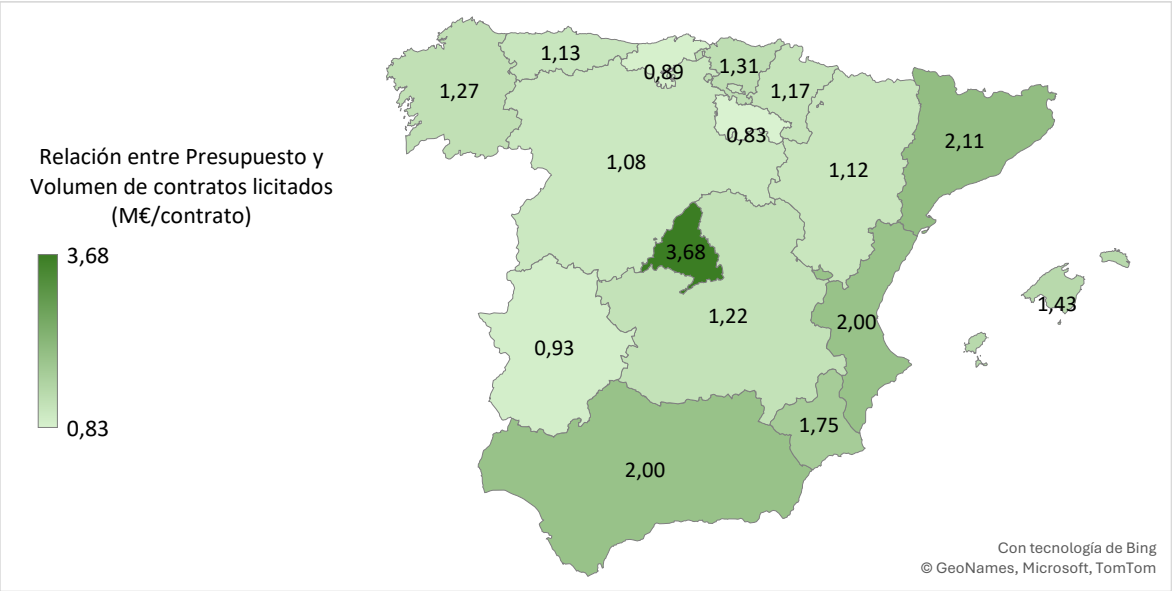


Figura 3. Mapa con la Relación de presupuesto licitado frente a número de contratos licitados por Comunidades Autónomas en el periodo 2010-2025. Fuentes: MITECO, 2023; Ministerio de Hacienda, 2026; Agencia Catalana del Agua, 2025, Canal de Isabel II, 2025; ESPAR, 2024

2.3. Gestión de activos de infraestructuras hidráulicas.

La gestión de activos en el sector de agua se encuentra en un modelo reactivo en la práctica totalidad del sector, el cual se basa en mantenimientos correctivos (reparar la avería cuando ocurre) como preventivos (realizar trabajos de mejora para tratar de evitar una avería y prolongar la vida útil del activo). Este modelo hace que España se registren entre 18 y 24 averías por cada 100 km de red de distribución de agua *(AEAS, 2022)* realizándose entre 45000 y 60000 reparaciones anuales de urgencia. En la red de saneamiento están alrededor de 15000 reparaciones al año.

Desde el origen de la explotación de las redes de abastecimiento hasta finales del siglo XX, la gestión se realizaba con mapas en papel, listados de los elementos que componían la red con los detalles básicos para su explotación (diámetros y tipos de elementos: válvulas de corte, ccaudalímetros, válvulas de seguridad, desagües, ventosas…) y el conocimiento heredado de los operadores locales (había que preguntar cuándo se instaló el elemento que marca el plano, o si ese elemento seguía instalado). En cuanto al tipo de mantenimiento, era prácticamente correctivo debido a la “poca antigüedad” de las redes y a la falta de implementación del proceso de inspecciones visuales y mantenimientos.

A comienzos de la década de los 2000 aparecen los primeros sistemas de información geográfica (GIS), los cuales hacen que los inventarios de años previos en formato papel comiencen a digitalizarse. Estos inventarios digitales permitieron georreferenciar los elementos (ubicarlos en el espacio y poder mandar coordenadas a las personas encargadas de la explotación de infraestructuras ir al lugar donde se ubican los elementos, sin conocer previamente la historia de la red). A su vez, mediante tablas, se pudieron asociar más datos que el diámetro y el tipo de elemento, como, por ejemplo: la fecha de instalación, el instalador, el material de los elementos… Gracias a estos avances, se pudieron desarrollar herramientas informáticas que permitían establecer los primeros sistemas de mantenimiento preventivos sistemáticos. Las tecnologías de búsqueda de fugas no intrusivas en las redes a presión (mediante geófonos o correladores) se pudieron implementar y desarrollar.

En la década del 2010, los SIG dieron paso a programas de modelización y simulación hidráulica, como por ejemplo EPANET o SWIM, los cuales sirven para modelar y simular redes de abastecimiento y de saneamiento, respectivamente. Estos modelos se alimentaban (y se alimentan) de sensores instalados en la red para la monitorización continua mediante la creación de sectores

(sectorización), permitiendo obtener datos de caudal y presión a lo largo del tiempo. Gracias a estos avances aparecen los conceptos de Agua No Registrada o ANR, permitiendo localizar fugas más complejas o problemas de funcionamiento en la red de distribución, mejorando el mantenimiento preventivo. La gestión de activos empieza a priorizar la renovación basándose en el riesgo de rotura y el impacto socioeconómico del fallo, transitando hacia el mantenimiento predictivo *(MITECO, 2023)*.

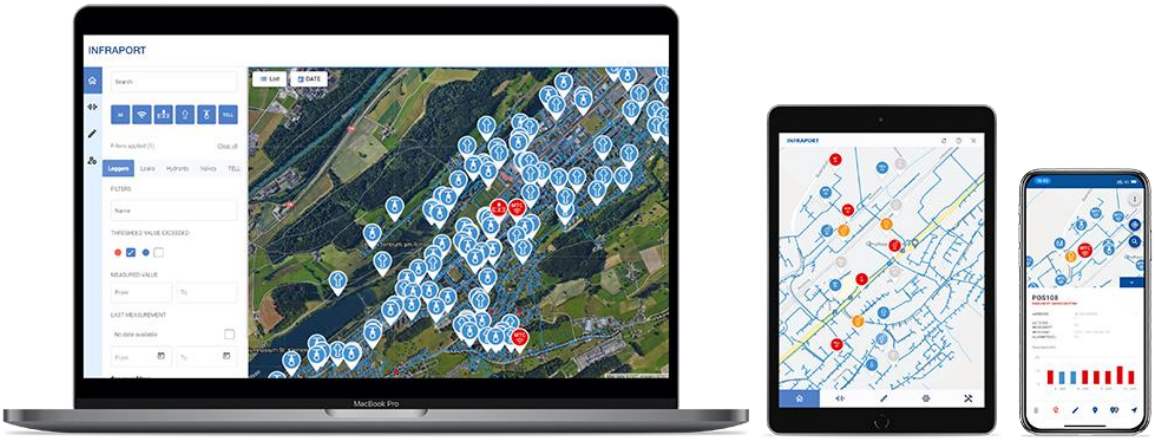


Figura 4. Sistema INFRAPORT para el registro y localización de fugas. Fuente: vonRoll hydro

En la última década, los inventarios de elementos registrados mediante elementos vectoriales y tablas asociadas en un mapa transitan hacia un modelo tridimensional (3D) mediante el empleo de ficheros informáticos con un esquema de datos abiertos (IFC, GML) que permiten la interoperabilidad entre diversos programas informáticos. Estos datos se pueden complementar con los datos en tiempo real del funcionamiento de las instalaciones (sistemas SCADA) permitiendo tanto la simulación como la operación a tiempo real. Esto hace que el inventario se transforme en un Gemelo Digital, poniendo en valor el mantenimiento predictivo, optimizando los recursos para el mantenimiento preventivo y reduciendo los recursos para el mantenimiento correctivo.

La digitalización del sector del agua promovida por los PERTE, pretende transitar a un modelo predictivo basado en el valor de los datos. Conocer que tipo de válvula falla en ciertas ubicaciones de una red de distribución ya sea por componentes o por el funcionamiento de la red bajo ciertas condiciones de presión, caudal o temperatura; o determinar que el número de averías de cierto sector puede venir generada por la maniobra de una válvula de seccionamiento mediante la

simulación del funcionamiento de la red con un gemelo digital están dentro de este mantenimiento predictivo.

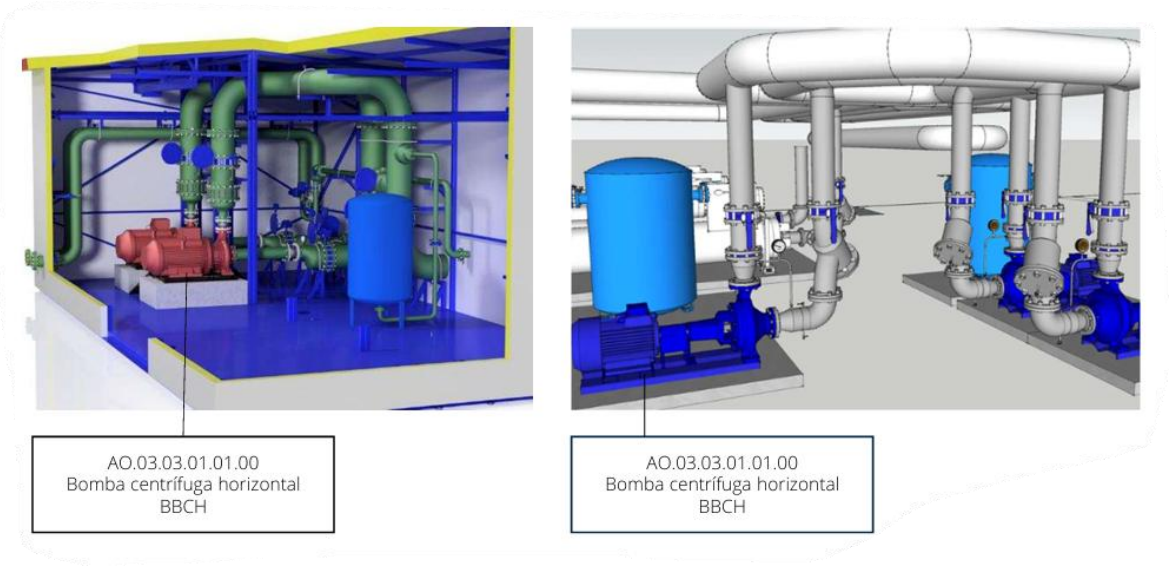


Figura 5. Gemelo digital de una estación de bombeo de aguas residuales. Fuente: AEAS, 2026

La implementación de los sistemas de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador o GMAO, permite que el sistema planifique, monitorice y registre cualquier intervención humana o automatizada sobre los activos hidráulicos registrados en su base de datos.

Estos sistemas permiten alargar la vida útil de los equipos y reducir los costes de operación del sistema (OPEX). Según SEOPAN *(SEOPAN, 2025)*, el aumento de la vida útil de los equipos electromecánicos críticos como: bombas de impulsión, soplante de reactores biológicos o membranas de ósmosis, permitiendo reducir los costes hasta en un 25%, reduciendo el stock de repuestos disponibles y minimizando los tiempos de inactividad no planificados.

Otro de los beneficios del empleo de los GMAO es el control del agua no registrada (ANR), gracias al seguimiento de las actuaciones u órdenes de trabajo del GMAO (maniobra de elementos, reparación de averías…) con las alarmas de los sistemas de telelectura (sistemas SCADA) se reduce significativamente el tiempo de respuesta a roturas ocultas y se mejora el funcionamiento de la red gestionada.

Al igual que permite hacer el seguimiento de las órdenes de trabajo, también permite enviar y ubicar en tiempo real a los dispositivos móviles de los operarios el trabajo a realizar, reduciendo los tiempos de espera, optimizando el nivel de respuesta ante una incidencia y registrando los posibles motivos de la avería y las actuaciones correctivas empleadas, alimentando al GMAO y haciendo más robusta la base de datos de la que se basa para el mantenimiento predictivo.

Empresas del sector del agua en España como son Canal de Isabel II (Comunidad de Madrid), Veolia (Agbar) (Área Metropolitana de Barcelona) o EMASESA (Sevilla) ya tienen implementadas estas herramientas con ciertas particularidades como por ejemplo EMASESA, la cual utiliza modelos de inteligencia artificial para determinar y priorizar que redes de abastecimiento y saneamiento deben renovarse *(AEAS, 2022)*.

2.4. Sostenibilidad en la explotación de infraestructuras hidráulicas.

La sostenibilidad en el sector del agua ha evolucionado de una perspectiva orientada al volumen y la calidad física del recurso hídrico a una más relacionada con los recursos necesarios para poder almacenarla, tratarla, transportarla, distribuirla y volverla a tratar para devolverla al medio natural. Estis recursos no se centran únicamente en el denominado nexo agua-energía que describe el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), sino también en la ocupación del suelo y la afección medioambiental al entorno de la ubicación de las infraestructuras necesarias para aprovechar el recurso hídrico (presas, canales, plantas de tratamiento, plantas de depuración…).

Con respecto al nexo agua-energía, el sector del agua a nivel mundial consume alrededor del 4% de la electricidad global y esta cifra aumentará en 2040 a medida que tengamos que usar desalinización y tecnología para la reutilización *(IPCC, 2022)*.

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las plantas de tratamiento de aguas residuales son una de las principales fuentes de emisión. El tratamiento biológico genera emisiones de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) 300 veces superior al CO_2 emitido (*IPCC, 2019*), siendo estas las responsables del 1,5% de las emisiones globales de GEI (*IPCC, 2022*).

Para abordar la escasez de agua causada por el cambio climático, las regiones de Oriente Medio, África del Norte y las áreas costeras globales están expandiendo rápidamente la desalinización de agua de mar. Sin embargo, el IPCC advierte que, si bien esto resuelve el estrés hídrico a corto plazo,

aumenta significativamente la huella de carbono ya que es un proceso altamente intensivo en energía (ósmosis inversa) y no es sostenible con el 100% de la energía empleada en el proceso *(IPCC, 2022)*.

Los grandes embalses artificiales hacen una contribución significativa al medio ambiente al descomponer la materia orgánica que se inunda para liberar burbujas de metano a la atmósfera y afectar el contenido de carbono del suelo *(IPCC, 2019)*.

Las directrices del IPCC se implementan en España a través del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y de este organismo se transfiere a los planes de sostenibilidad de las principales organizaciones de gestión de cuencas e infraestructuras urbanas.

Debido al clima semiárido y a la alta vulnerabilidad a la desertificación, España es uno de los potenciales emisores de gases de efecto invernadero y de ocupación del suelo debido al empleo de las técnicas antes mencionadas para mitigar la ausencia del recurso hídrico y hacer una gestión eficaz del mismo dentro del ciclo integral del agua. Esta casuística implica mejoras tanto en las infraestructuras ya existentes de la mano de la digitalización del sector *(MITECO, 2022)*

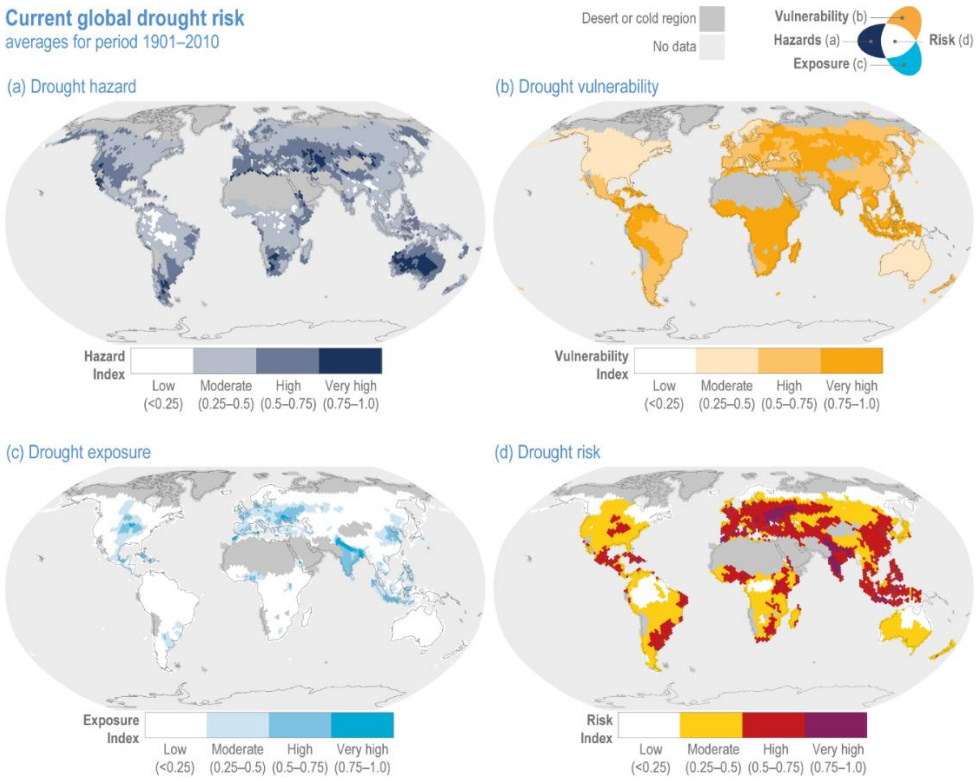


Figura 6. Riesgo actual de sequía global y sus componentes. Fuente: IPCC (2022)

Según los informes de la Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEAS) y la Asociación de Empresas Gestoras de Servicios de Agua Urbana (AGA), el sector urbano del agua en España consume un promedio de 0.68 kWh por metro cúbico para el suministro y la potabilización en el caso de las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa en el arco mediterráneo y las Islas Canarias. Esto convierte al sector del agua en uno de los principales consumidores de energía industrial del país *(AEAS, AGA, 2024)*.

Para tratar de paliar estas emisiones, los principales gestores del ciclo integral del agua en España están transformando las EDAR en biofactorías. Un ejemplo son las plantas de tratamiento avanzado donde los lodos del proceso de depuración se utilizan para producir biogás a través de la digestión anaeróbica *(MITECO, 2023)*. La co-digestión permite a plantas a gran escala como puede ser la EDAR Cuenca Media del Arroyo Culebro del Canal de Isabel II o la EDAR Albufera Sur de la Entitat Pública de Sanejament d'Aigües Residuals de la Comunitat Valenciana (EPSAR) alcanzar niveles de autoconsumo energético del 60% al 100% para sus operaciones en el área y así reducir su huella de carbono.

El MITECO, a través de la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), está exigiendo gradualmente a las confederaciones hidrográficas y a los principales organismos y gestores del sector del agua que registren su huella de carbono como parte del registro nacional de buenas prácticas. La huella hídrica (un indicador basado en la huella ecológica que evalúa la cantidad de agua dulce utilizada y contaminada) se utiliza para evaluar el alto uso en el sector agrícola que constituye el 80% de la huella hídrica total de la nación *(MITECO, 2023)*.

2.5. Metodología BIM en el Sector del Agua. Licitaciones con metodología BIM para la conservación de infraestructuras (Gestión de activos)

La metodología BIM (Building Information Modelling) en España ha pasado de ser una iniciativa tecnológica privada a un requisito estratégico y normativo en la contratación pública. En el ámbito de las infraestructuras hidráulicas, su integración está transformando a paso lento la forma en que se diseñan, construyen y, especialmente, se operan y mantienen los activos del ciclo del agua.

El despliegue de la metodología BIM en España ha sido desigual pero gradualmente convergente entre el sector privado y las administraciones públicas. El sector privado (grandes firmas de ingeniería, constructoras y promotoras) fue el primer impulsor del BIM en España desde 2010 hasta

2018. Impulsadas por la necesidad de competir en mercados internacionales (por ejemplo, Reino Unido o EEUU) donde la integración con la metodología BIM ya era obligatorio, las empresas españolas maduraron rápidamente en modelado 3D, detección de interferencias y optimización de costos operativos. En el ámbito residencial y comercial nacional, la implementación privada se consolidó para reducir desviaciones presupuestarias durante la fase de construcción. En cambio, el sector público estuvo más fragmentado hasta la creación de la Comisión BIM (originalmente patrocinada por el Ministerio de Fomento) y el lanzamiento del Observatorio de Licitaciones BIM administrado por el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible.

El verdadero hito institucional llegó con la aprobación del Plan para la Incorporación de la Metodología BIM en la Contratación Pública (Real Decreto 393/2023). Establece un calendario obligatorio y progresivo de umbrales económicos para los contratos públicos: desde niveles de uso "Básico" en 2024 hasta niveles "Avanzados" fijados para 2030 (*Comisión Interministerial BIM, 2023*).

Según el Observatorio, el número de licitaciones públicas que requieren requisitos BIM ha crecido exponencialmente, pasando de ser testimonial en 2017 a representar miles de millones de euros en el presupuesto público acumulado, con las administraciones regionales y locales liderando el volumen de expedientes, y el estado liderando los proyectos de mayor presupuesto (*Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024*).

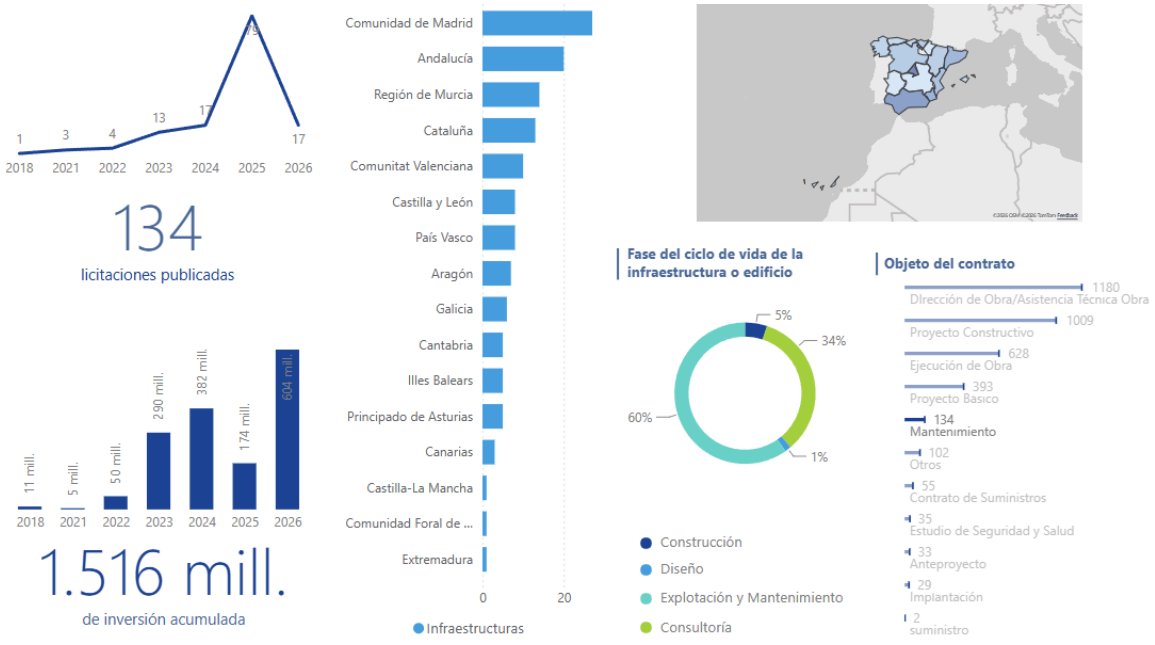


Figura 7. Datos cuantitativos generales con objeto del contrato Mantenimiento del cuadro de mando del Observatorio BIM. Fuente: Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2026

A diferencia de las infraestructuras de edificación o transporte ferroviario (alta velocidad), donde el uso del BIM fue natural y temprano, las infraestructuras hidráulicas (EDAR, ETAP, colectores, presas) tuvieron una adopción más compleja. Esto se debe a que un activo hídrico combina obras civiles subterráneas o lineales con sistemas de procesos industriales, mecánicos y eléctricos complejos (equipos de bombeo, reactores, válvulas), requiriendo un estándar BIM de alta madurez técnica.

Durante la primera mitad de la década de 2010 las licitaciones fueron testimoniales ya que no existía una clasificación específica para infraestructuras hidráulicas ni un modelo claro de valor del empleo de la metodología en el sector. Solo hay proyectos piloto para grandes colectores o plantas de tratamiento en marcha que son promovidos de forma aislada por grandes empresas para probar la tecnología. Ya en la segunda mitad de la década, a raíz de la Directiva Europea de Contratación Pública 2014/24/UE, grandes organismos públicos y empresas publicas licitadoras empiezan a incluir cláusulas elevables en los Pliegos de licitación (mayor puntuación técnica) si la empresa que opta a la licitación proporciona el modelo digital del proyecto en formato nativo e IFC. Estas licitaciones están orientadas en la redacción y ejecución de proyectos constructivos.

Ya en la última dedicada, el número de licitaciones con requisitos BIM se quedan cerca de los 200 contratos, con un presupuesto superior a los 1000 millones de euros. Este impulso viene auspiciado por el auge de los fondos del MRR (NextGenerationUE) y la presión del PERTE de la digitalización del ciclo del agua hace que la financiación europea está más ligada a la digitalización, encontrando como palanca el empleo de metodología BIM. La mayoría de las especificaciones técnicas de proyectos de envergadura licitados ya incluyen herramientas contempladas en la metodología BIM como el entorno común de datos (CDE) bajo el estándar de las normas UNE EN-ISO 19650.

En los últimos años, la implementación del Plan BIM del Gobierno de España promovido en el año 2024 deja de ser un bono técnico para convertirse en un requisito obligatorio de exclusión o ejecución para la mayoría de los contratos de ingeniería hidráulica estatal por encima del umbral económico (*Comisión Interministerial BIM, 2023*). Esto provoca que el número de licitaciones en los últimos dos años (2024-2026) esté cerca de los 240 contratos, con un presupuesto próximo a los 2000 millones de euros.

Uno de los grandes campos de desarrollo de la metodología BIM en el sector del agua no se basa ya en el modelado de construcción (BIM 3D/4D), sino en BIM 6D y 7D (Sostenibilidad y Gestión de Activos / Gestión de Instalaciones). Actualmente *(Observatorio BIM, 2025; SEOPAN, 2025*), el 12%

del presupuesto total de las licitaciones públicas nacionales con requisitos BIM corresponde al sector de las infraestructuras hidráulicas y el ciclo del agua. De la totalidad de los contratos con los requisitos de metodología BIM, el 20% de los contratos han sido formulados para la gestión de activos, operación, mantenimiento de modelos ya existentes o para la creación de cero de modelos digitales para poder enlazar a los GMAO.

El 20% de los contratos BIM destinados a mantenimiento están viendo un aumento significativo en los últimos años arrastrados por los principales licitadores en el sector del agua (EPSAR o Canal de Isabel II) dado a que los contratos que están licitando y adjudicando se requiere explícitamente vincular el modelo BIM de la planta a sistemas GMAO y SCADA.

2.6. Casos prácticos de aplicación de metodología BIM en entornos con GMAO o Sostenibilidad.

- **Aeropuerto Internacional de Denver (BIM-GMAO)**

El Aeropuerto Internacional de Denver (DEN) realizó uno de los casos más sólidos de BIM-GMAO integrando la gestión operativa de más de 1,5 millones m^2 de instalaciones. Para abordar la desconexión habitual entre diseño y explotación de instalaciones la administración del aeropuerto no aceptó modelos genéricos de obra sino que desde los pliegos de licitación definieron unos Requisitos de Información de Activos (AIR) muy estrictos. En lugar de sobrecargar con geometría tridimensional innecesaria el sistema preparamos datos alfanuméricos esenciales para operación (números de serie, especificaciones de mantenimiento, garantías y codificación unívoca activos), filtrando información crítica para que fuese compatible con lógica del mantenimiento diario.

Para lograr esta integración el Aeropuerto creó pasarelas de sincronización bidireccional (como ModelStream y herramientas ETL) que conectaban directamente los modelos de diseño e infraestructura con su software corporativo de mantenimiento *IBM Maximo*. Así miles de equipos fueron volcados al inventario del GMAO sin transcripciones manuales, errores humanos disminuyeron y tiempos de puesta en marcha se redujeron. El personal técnico pudo asociar órdenes de trabajo a la ubicación espacial y técnica exacta de los equipos para garantizar que el modelo digital sea un registro vivo operativo que respalde las decisiones durante todo el ciclo de vida del aeropuerto.

- **Red de Carreteras de Noruega (BIM-LCA)**

La administración pública noruega (Dirección Estatal de Carreteras Statens vegvesen y empresa pública de infraestructuras Nye Veier) impulsó el cálculo de emisiones de gases efecto invernadero en obra civil haciendo obligatorio incluir los datos de emisiones de CO_2 en sus licitaciones.

Los modelos digitales abiertos basados en estándares (IFC) tienen asociados cada unidad de obra —explanación, capa firme, estructura de hormigón o red de drenaje— atributos precisos de cubicación y tipología de material asociado. Esta estructuración rigurosa de datos permite conectar directamente los modelos con herramientas nacionales de cálculo (VegLCA) y bases de datos oficiales Declaraciones Ambientales Producto (EPD).

Gracias a esta automatización equipos de ingeniería pueden evaluar la huella de carbono de proyectos en tiempo real desde muy temprano en el diseño. En lugar de hacer balances ambientales teóricos a posteriori el flujo BIM–GEI permite cuantificar y comparar en kilogramos de CO_2 los impactos de distintas alternativas de trazado, balance de tierras o especificaciones materiales antes del inicio de las obras. Esto hizo que Noruega fuera referencia internacional al alinear la contratación pública con objetivos vinculantes de descarbonización durante todo el ciclo de vida de la infraestructura.

- **Aeropuerto de Ámsterdam-Schiphol (BIM-GMAO-LCA)**

El Aeropuerto de Ámsterdam-Schiphol estableció un modelo integral de gestión conectando información sobre sus activos digitales con su operativa diaria y sus objetivos de descarbonización y economía circular.

Toda la infraestructura física (terminales y redes fluidas hasta sistemas electromecánicos) se estandarizó bajo OpenBIM modelos e identificadores unidimensionales, identificadores de materiales con cubicaciones precisas y propiedades del LCA. Esta base de datos espacial técnica volcó directamente en su sistema de gestión mantenimiento (*IBM Maximo*), así que el inventario garantías intervenciones preventivas y correctivas estaban totalmente sincronizados con la realidad física del aeropuerto.

Lo único diferente de Schiphol es incorporar el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) dinámicamente al flujo de trabajo del GMAO. No se trata entonces de una huella de carbono estática anclada en la fase del proyecto sino que el sistema actualiza emisiones en tiempo real: cada orden de trabajo donde sustituye un componente o material computa el carbono embebido asociado a través de bases de datos EPD; los datos consumo energético traducen en carbono operacional georreferenciado en modelo; etc.

El gemelo digital es así un panel ambiental y operativo para evaluar las decisiones de mantenimiento no solo por coste financiero ni técnica crítica sino también por impacto acumulado en emisiones CO2e.

3. ESTADO DEL ARTE

En el siguiente capitulo, se ahonda en la diversa documentación que existe sobre los cuatro pilares donde pivota esta investigación: la gestión de activos, la metodología BIM, la fase de operación y explotación de una red de distribución y el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para la gestión de activos y la metodología BIM, se revisarán las normas que posteriormente se emplearán para el desarrollo de la metodología.

Después se hará un inventario con la documentación asociada de los distintos procedimientos alrededor del mundo para la explotación y el mantenimiento de una red de distribución de agua. Este estudio será significativo porque será la base del establecimiento de los planes de mantenimiento.

Acto seguido se revisará la documentación sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente auspiciadas por normativa ISO. La revisión de esta documentación apuntalará el cuarto pilar objeto de esta investigación, que es la comprensión y la determinación de la emisión de gases de efecto invernadero en los procesos de mantenimiento y reparación de una red de distribución.

Finalmente, se expondrán los aspectos más relevantes de como se han materializado la implementación de las dimensiones 6D y 7D en otros ámbitos con metodología BIM.

3.1. Gestión de activos

3.1.1. Familia de las ISO 55000

La familia UNE-ISO 55000 son las normas de referencia para la Gestión de Activos, destinada a ayudar a las organizaciones a extraer el máximo valor de sus activos (físicos, financieros, humanos o intangibles) equilibrando costes, riesgos y rendimientos.

La familia está compuesta de tres normas: la UNE-ISO 55000:2025 la cual establece la base del marco conceptual, describe la terminología común, los principios generales de la gestión de activos,

así como el contexto dentro de una organización de lo que es un activo y cómo puede ser utilizado para la creación de valor.

Un aspecto interesante es el concepto de valor que indica la norma 55000:2025, el cual va a marcar el rumbo de este Trabajo Fin de Máster, **generar valor a la aplicación de la metodología BIM en la operación y mantenimiento de una red de abastecimiento**. Si no se es capaz de generar un valor que aprecien tanto los responsables como los usuarios del Sistema de Gestión de Activos (SGA), tanto la herramienta como la metodología BIM no serán de aplicación y, por tanto, no tendrá valor.



Figura 8. Ciclo de vida de la gestión de información genérica de proyectos y activos. Fuente: AENOR (2019)

La UNE-ISO 55001:2024 establece los requisitos que debe tener un SGA para que pueda ser certificable y auditable. También proporciona los requisitos necesarios para el establecimiento, mantenimiento y mejora del SGA, dándole importancia a criterios de sostenibilidad, gobernanza y gestión del cambio del activo a lo largo de su vida útil. La norma recoge que el objetivo principal de implementar un sistema de gestión de activos es dar una herramienta a la organización que posee una serie de activos a obtener un valor a partir de dichos activos, alcanzando un equilibrio óptimo y sostenible entre costes, riesgos y rendimiento a lo largo del ciclo de vida del activo. Este último aspecto es fundamental a la hora de aplicar metodología BIM, como referirán la familia de normas UNE-ISO 19650.

Finalmente, la UNE-ISO 55002:2020 se trata de una guía de aplicación para orientar en la aplicación de los requisitos que vienen indicados en la norma UNE-ISO 55001:2024.

3.1.2. Sistema de Gestión de Activos (SGA)

La implementación de un SGA tiene que asegurar que la gestión de los activos físicos, de infraestructura o tecnológicos esté en línea con el propósito estratégico de la empresa o del organismo público (si no lo está, cae en el riesgo de no tener valor y que acabe fracasando).

Un SGA bien estructurado permite identificar, reducir y gestionar los riesgos operativos, ambientales y financieros de los activos, clave en el caso de una red de suministro para unos habitantes. De la misma manera, el SGA se puede emplear como una herramienta para la toma de decisiones a la hora de cómo gestionar el activo, establecer planes de mantenimiento en función de su criticidad, realizar actuaciones de mejora optimizando recursos o plantear otros activos con las mismas o similares funciones que puedan mejorar el sistema. Estas optimizaciones repercuten en el cumplimiento de los criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG), minimizando la huella de carbono y el uso de recursos.

Para darle valor a la implementación del SGA, la normativa establece diversos aspectos que debe cumplir el Sistema: liderazgo, mediante el establecimiento de roles y responsabilidades (determinar quién es el responsable de la toma de decisiones, en la operación y en la supervisión tanto del SGA como del propio activo); planificación, con el establecimiento de Planes de Gestión de Activos (PGA) en los que se detallan actividades, recursos , responsables y plazos para los activos; apoyo, estableciendo canales de comunicación entre los distintos actores que participan en la gestión del activo y el acceso a la información a los datos de los activos, estableciendo protocolos de supervisión y control de la documentación que se aporta al activo; operación, con la creación de un plan de control y supervisión del mantenimiento, renovación y desmantelamiento de los activos dentro del PGA. También establece el control y supervisión de las actividades dentro de ese plan de control y supervisión a terceros fuera de la organización (subcontratación); y por último mejora, mediante el registro de los fallos o averías producidas en los activos y la posterior investigación para la proposición de actuaciones o acciones de mejora en los propios activos o en la adquisición de nuevos activos.

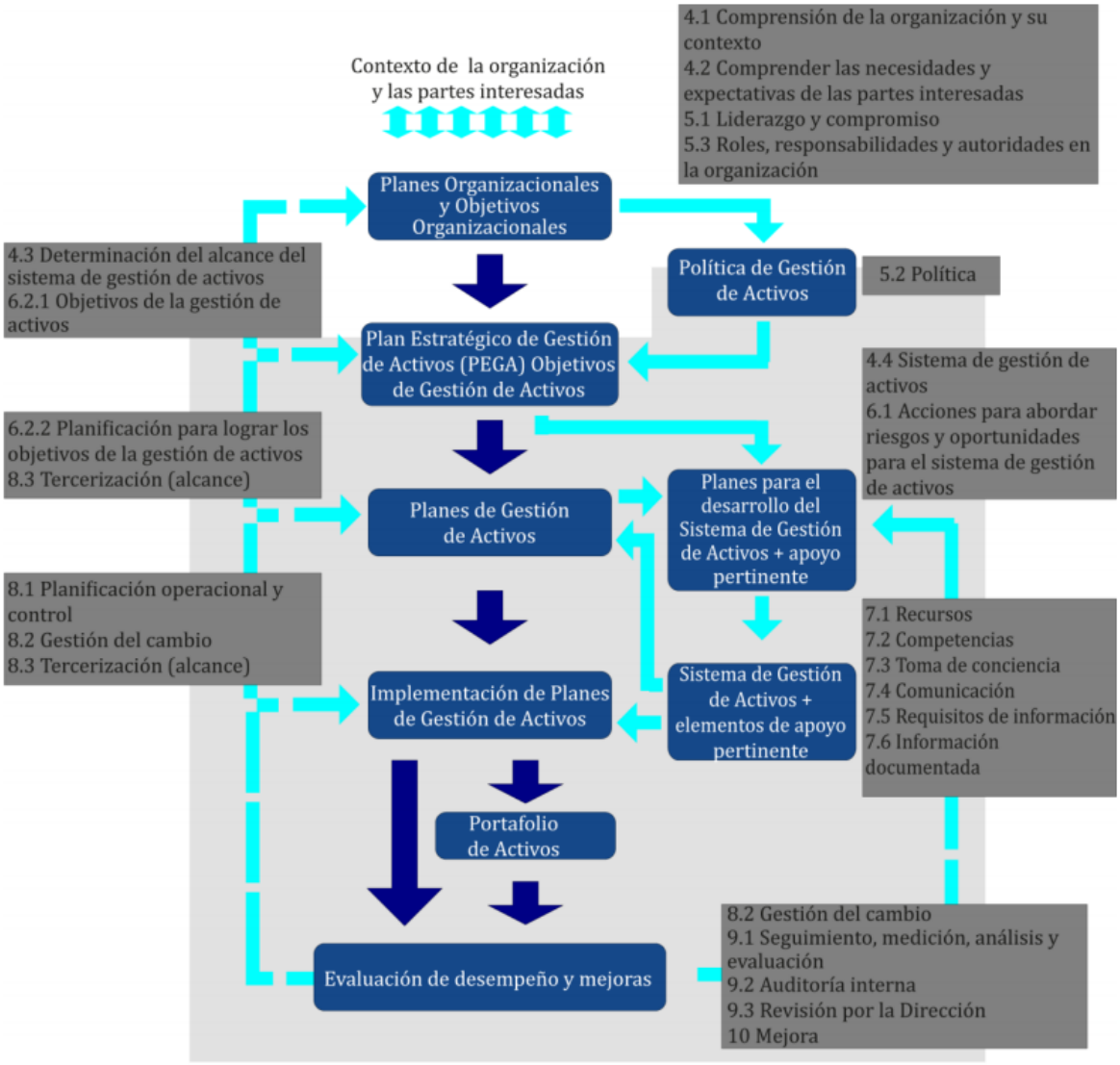


Figura 9. Relación entre los elementos clave de un sistema de gestión de activos. Fuente: AENOR, 2020

3.2. Metodología BIM

3.2.1. Familia de las UNE-EN ISO 19650

La serie de normas UNE-EN ISO 19650 es el marco normativo para la gestión y digitalización de la información sobre obras de construcción e ingeniería civil a través del BIM (Building Information Modelling).

La serie está compuesta por **seis normas** las cuales abarcan desde los conceptos y principios, fase de entrega y desarrollo, fase de operación de los activos, entrega de la información y seguridad en

la gestión de la información y seguridad y salud Esta familia sigue la estela de la familia UNE-EN ISO 55000 desarrollada en el capítulo anterior.

La UNE-EN ISO 19650-1:2019 establece los conceptos y principios en la aplicación de la metodología BIM. Define la necesidad de establecer un único origen de datos denominado **Entorno Común de Datos** o **CDE** el cual tiene que poseer unos estados para conocer el estado de la información (en proceso, compartido, publicado o archivado). La norma establece la definición de requisitos y jerarquía de la necesidad de información para la organización (OIR), activos (AIR), proyectos (PIR) e intercambio (EIR). En este último punto se fija el Nivel de Necesidad de Información o LOIN el cual trata de ser más específico a la hora de determinar la cantidad de detalle geométrico y alfanumérico necesario en cada hito del ciclo de vida del activo (sustituyendo al LOD o Level of Development). Finalmente asigna responsabilidades tanto a la parte contratante (cliente), al adjudicatario principal (contratista) y adjudicatarios secundarios (subcontratas o proveedores).

La norma UNE-EN ISO 19650-2:2021 se centra en la fase de entrega de los activos mediante el establecimiento de un sistema de ocho pasos desde el comienzo de la licitación hasta la ejecución del proyecto (Evaluación de necesidades, solicitud de ofertas, presentación de ofertas, adjudicación, movilización, producción colaborativa, entrega del modelo y fin del proyecto). Al tratar con la licitación aparece un documento que también es fundamental y que debe de aparecer en todas las licitaciones que empleen metodología BIM, el **Plan de Ejecución BIM** o **PEB** (o BEP), el cual establece las condiciones de entrega y de desarrollo del proyecto de acuerdo con las especificaciones del cliente: recursos informáticos, capacidades técnicas, capacidades BIM del contratista. Finalmente define el Modelo de Información del Proyecto o PIM el cual tiene que determinar la progresión de los proyectos durante su elaboración y desarrollo hasta la entrega final.

La UNE-EN ISO 19650-3:2021 trata la fase de operación de los activos, definiendo cómo estructurar el conjunto de modelos, datos y documentos enfocados al mantenimiento y la explotación diaria del activo. Este sistema es denominado **Modelo de Información del Activo** (**AIM**). Identifica los desencadenantes del activo durante la fase de operación: como proceder en eventos imprevistos o planificados que requieran actualizar el AIM (averías, rehabilitaciones, sustituciones…). Alinea la información BIM a los sistemas de gestión de activos del cliente, ya sea con un GMAO o con un SIG e indica las pautas a seguir para la transferencia del PIM al AIM sin una pérdida de trazabilidad.

La cuarta norma, UNE-EN ISO 19650-4:2023 se centra en los criterios de verificación y aprobación para asegurar que una entrega de información del PIM sea completa, admisible y cumpla con los requisitos de intercambio (EIR) definidos en la UNE-EN ISO 19650-1:2019. Prioriza el uso de formatos abiertos e interoperables (OpenBIM y estándares abiertos, GML, IFC…) para evitar la dependencia de un número limitado de programas informáticos. Finalmente, indica que la precisión, sintaxis, estructura técnica y semántica de las tablas y modelos intercambiados tiene que garantizar la integridad de los datos mediante controles de calidad.

La UNE-EN ISO 19650-5:2020 establece criterios de evaluación de seguridad y niveles de acceso a la información. La información intercambiada requiere de una evaluación de sensibilidad de la información que contiene frente a amenazas (terrorismo, sabotaje, espionaje industrial, ciberataques…). Para ello se requiere un Plan de Seguridad de la Información en el cual se tienen que diseñar protocolos específicos de seguridad en el acceso a modelos e imágenes del proyecto. Finalmente, promueve el cumplimiento de buenas prácticas digitales en toda la cadena de intercambio de información que interactúa con la información del activo.

Finalmente, la norma UNE-EN ISO 19650-6:2025 establece los requisitos y principios para estructurar, compartir y gestionar la información relativa a seguridad y salud laboral (Health and Safety) durante todo el ciclo de vida del activo en BIM. Su objetivo principal es integrar la prevención de riesgos laborales en todo el ciclo de vida del activo. Define cómo vincular datos de riesgos a los modelos geométricos así como las bases de datos del proyecto (identificación anticipada de peligros; mitigación por diseño seguro y trazabilidad medidas preventivas). También describe cómo deben fluir estos requisitos preventivos dentro del marco general de la serie ISO 19650 (integrando los requisitos de información de organización, activo y proyecto), para asegurar que la información crítica de seguridad no quede aislada en documentos estáticos sino disponible para todos los agentes involucrados en el CDE.

3.2.2. Actualizaciones de las normas ISO 19650 en 2026

Actualmente, las normas ISO 19650 se encuentran en un proceso de actualización desde el año 2024 el cual propone cambios a la hora de la gestión de la información en todo el ciclo de vida del activo. Desde marzo de 2026 (1 y 2) y mayo de 2026 (3) BSI (British Standard Institution) ha publicado los borradores de las tres primeras partes:

- *BS EN ISO 19650-1 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management —. Part 1: Concepts and principles*

- *BS EN ISO 19650-2 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management —. Part 2: Information management process*

- *BS EN ISO 19650-3 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management —. Part 3: Implementation of the information management process*

El proceso de gestión de la información con la norma actual separa, la fase constructiva de la fase de operación, fin de vida y reciclaje. Esto es un problema ya que los proyectos que se ejecutan con metodología BIM suelen ser infraestructuras construidas para durar muchos años y la documentación que se solicita se centra más en el detalle constructivo y de modelado que de información que es vital para el ciclo de vida del activo, como puede ser guías de mantenimiento, informe de emisiones de GEI a lo largo de su vida útil.

Por ello, los nuevos borradores proponen varios cambios *(Plannerly Help Articles. (s. f.))*:

- Eliminación de la fase de entrega y fase operativa para unificar el proceso. Con las normas actuales (ISO 19650-2 e ISO 19650-3), hay que pasar por un proceso de 9 pasos el cual acaba aislando el intercambio de información entre pasos y se pierda información relevante. Esto hará que los operadores participen desde el primer momento en los proyectos que posteriormente, cuando finalice la obra recibirán.

- El modelo de información del activo (AIM) se concibe como la base de información del activo durante todo su ciclo de vida, por ello, a la hora de generar información alrededor de los modelos, deberán tener sentido para que puedan ser empleadas a lo largo de su vida útil.

- Los nuevos procesos separan las tareas de gestión de la información de las tareas de producción de la información por lo que las actividades del operador se tendrán más en cuenta en el momento de la fase de producción de la información.

- Se propone un cambio de terminología ya que las abreviaturas actuales (BEP, EIR, IM), denotan un lenguaje más constructivo (en el sentido de la construcción) y menos de gestión o de información. Por ello, se proponen diversos cambios en las abreviaturas, como puede ser: BEP-PEB a IPP Information Production Plan o Plan de Producción de la Información, EIR a IPR Requisito de Producción de Información.

- Cambio en las perspectivas que hay que definir en el OIR, AIR y PIR. Centrados en el más allá, no todos los contratos que empleen metodología BIM tienen que ser grandes construcciones. La propuesta trata de identificar primero el propósito de quien va a recibir la infraestructura para luego explotarla o gestionarla.

- Favorecer la interoperabilidad entre normas es otro de los objetivos que tiene previsto la nueva actualización (incluidas las menos avanzadas en esta nueva actualización ISO 19650-4, 5 y 6). Esto se pretende hacer mediante la adicción de Anejos explicativos y con casos prácticos para favorecer la implementación de las nuevas directrices y de la propia metodología BIM.

Por lo tanto, si que se observa la motivación de este trabajo de investigación a raíz de estas actualizaciones de las normas ISO 19650.

3.2.3. Ciclo de vida de un activo en la metodología BIM

Según lo desarrollado en el apartado anterior, sin entrar en las actualizaciones propuestas por el BSI, en toda la familia de las normas UNE-EN ISO 19650, se gestiona toda la información del activo a través de BIM durante todo su ciclo de vida, desde la planificación inicial hasta su desmantelamiento.

Mientras que la norma UNE EN-ISO 19650-1:2019 establece la base general, el resto de las normas cubren cada fase operativa, de seguridad y de gobernanza de la información del activo.

En la UNE-EN ISO 19650-1:2019 se establece la jerarquía de los requisitos de información de arriba hacia abajo, teniendo en cuenta que la gestión de activos comienza mucho antes del diseño o la contratación: la empresa gestora o la administración define sus objetivos estratégicos de negocio o de empresa (OIR), los traduce en requisitos técnicos de activos (AIR) y estos se transfieren a los contratos de diseño y de construcción (EIR).

La UNE-EN ISO 19650-3:2021 establece el marco central para la gestión de infraestructuras. Define el proceso para mantener actualizado el modelo de información del activo (AIM), establece los posibles eventos desencadenantes que puedan hacer que el activo se modifique (fallos importantes, inspecciones reglamentarias, reemplazo de componentes, renovaciones…) desencadena en la necesidad de actualizar la información del AIM. También se establece los flujos de trabajo para registrar y verificar la información procedente de las incidencias o de los trabajos programados realizados sobre el activo para que queden vinculados y actualizados en el AIM sin comprometer la calidad de la base de datos alojada en el CDE y siendo interoperable con los GMAO o GIS de la empresa o cliente.

La transición entre nuevos activos y el modelo de información del activo queda definido en la UNE-EN ISO 19650-2:2021 asegurando que la transferencia de datos entre el PIM y el AIM sea verificable, completa y comprensible a largo plazo y que la entrega de la información se realice en los formatos establecidos en el PEB, realizándose para ello controles de calidad de la información requerida.

Finalmente, para la gestión de la información del AIM una vez entre en el SGA de un sistema de infraestructuras críticas o sensibles, se debe de establecer niveles de permisos para el acceso de la información. Estos aspectos quedan definidos en la norma UNE-EN ISO 19650-5:2020.

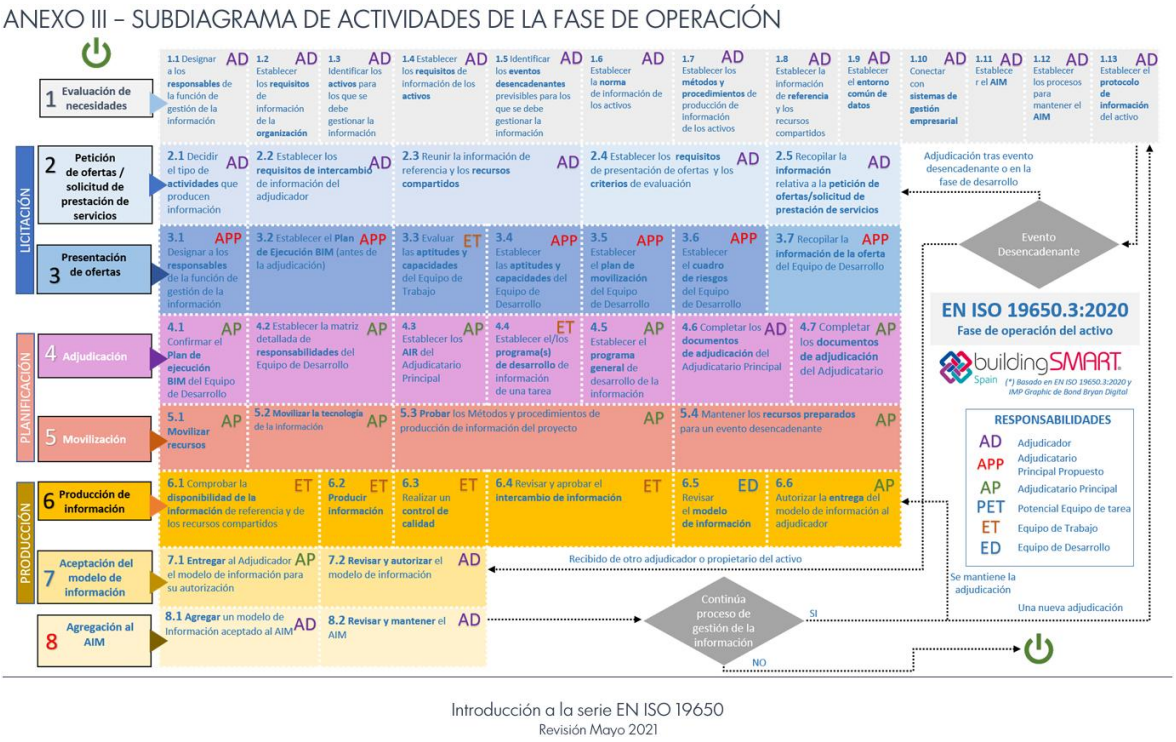


Figura 10. Esquema de actividades dentro de la fase de operación. OpenBIM

3.3. Mantenimiento de infraestructuras hidráulicas

Debido al gran número de guías y especificaciones técnicas a nivel mundial y las diversas infraestructuras que intervienen en el ciclo integral del agua, este trabajo se va a centrar en las siguientes infraestructuras: Depósitos para el almacenamiento de agua potable, tuberías de agua a presión, válvulas de seccionamiento, válvulas de aireación e hidrantes. La selección de estos elementos se basa en su frecuencia de aparición en cualquier red de distribución de aguas de pequeñas o grandes dimensiones.

3.3.1. Mantenimiento de depósitos para el almacenamiento de agua potable

- **España**

La Guía CEDEX R-20 (*Recomendaciones para el diseño, construcción y mantenimiento de depósitos de almacenamiento de agua potable*) es la referencia técnica en España para regular todo el ciclo de vida de los depósitos de almacenamiento de agua potable, desde el diseño hasta el mantenimiento de la estructura incluyendo la limpieza y desinfección de los compartimentos.

En ella se especifican medidas de seguridad y protección que deben tener los trabajadores que realicen operaciones dentro de la instalación, se define la campaña de vigilancia, control y medición del depósito, desde la puesta en servicio hasta el fin de su vida útil, principalmente mediante el registro y comprobación de los datos de nivel del depósito y de filtraciones recogidas en la red de drenaje. De igual manera, si se produjeran deformaciones que ocasionen fisuras o grietas, también tienen que ser registradas. Se establecen unos requisitos y periodicidades para la inspección visual y el mantenimiento, revisando los elementos hidráulicos que componen el depósito (elementos de cierre, valvulería, conducciones, corrosiones…) y las instalaciones auxiliares (escaleras, plataformas, alumbrado, instrumentación…). Finalmente define los requisitos para realizar la limpieza y desinfección de los compartimentos.

La periodicidad de las limpiezas en España viene marcada por el Real Decreto 3/2023, publicado el 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnicos-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. Dicho reglamento establece que para depósitos de menos de 10000 m^3 se realice al menos una limpieza cada 3 años.

- **Estados Unidos**

La American Water Works Association (AWWA) publica los manuales AWWA M42 (Steel Water-Storage Tanks) y M52 (Microbial Aspects of Water Transportation and Storage). Estos dos manuales son complementados con la normativa ANSI/AWWA C652 (Disinfection of Water-Storage Facilities).

El M42 trata sobre el diseño, inspección estructural, mantenimiento, limpieza y control de corrosión/protección catódica de depósitos (tanques) de acero. El M52 se centra en la gestión de la calidad del agua, eliminación de zonas muertas y control del tiempo de permanencia del agua dentro del tanque. Para la desinfección y limpieza de los depósitos se emplea la norma ANSI/AWWA C652, la cual establece como realizar el vaciado, desinfección, muestreo bacteriológico y puesta en servicio de los depósitos para el almacenamiento de agua potable.

La frecuencia de inspección exige inspecciones rutinarias mensuales y revisiones exhaustivas de la estructura interna y recubrimientos entre 3 y 5 años (mediante el vaciado o el empleo de buzos o ROV certificados).

- **Alemania**

La serie DVGW W 300 (Trinkwasserspeicher) es el equivalente alemán a la guía R-20 del CEDEX para las estructuras de almacenamiento de agua potable. Se divide en varios documentos en los cuales se definen las características de diseño y equipamiento en nuevas instalaciones (W 300-1), la operación, inspección, conservación, vaciado, limpieza de superficies internas y desinfección (W 300-2) y el mantenimiento de los revestimientos interior (morteros de cemento, resinas epoxis) y técnicas de rehabilitación estructural.

En Alemania, se establecen inspecciones rutinarias semestrales y exhaustivas cada 3 o 5 años.

- **Reino Unido**

En Reino Unido se emplea la WRc - Principles of Water Supply Hygiene & Service Reservoir Inspection Guide. Esta guía está elaborada junto a las empresas del sector (Water UK), estableciendo las directrices obligatorias para la inspección estructural de la cubierta y los compartimentos, la estanqueidad de los compartimentos, estado y diseño de los respiraderos y limpieza y desinfección de los vasos. Esta guía es complementada con la guía CIRIA Report C736 para la estanqueidad y mantenimiento de la estructura del depósito y de los drenajes que rodean a la estructura.

Las frecuencias de inspección en Reino Unido son entre 3 y 5 años al igual que en Alemania.

- **Japón**

Dada la alta vulnerabilidad de los tanques a los terremotos, la Japan Water Works Association (JWWA) regula los depósitos para asegurar la resiliencia de la estructura y en evitar el estancamiento del agua. El documento empleado es *la JWWA Design Criteria & Maintenance Guidelines for Service Reservoirs*, en el cual se desarrollan y especifican las pruebas periódicas de estanqueidad, inspección de juntas de dilatación flexibles antisísmicas y procedimientos para la renovación del agua dentro de los vasos y reducir el tiempo de permanencia mediante deflectores y mezcladores hidrodinámicos.

En Japón, la inspección visual se realiza cada tres meses (trimestral) y las inspecciones exhaustivas cada año o en el momento en el que se produzca un terremoto de gran magnitud.

En Australia, el código *WSA 03 - Part 4 (Water Supply Code of Australia – Reservoirs)* elaborado por la Water Services Association of Australia establece unos criterios para la gestión de los depósitos en presencia de altas temperaturas, abordando el mantenimiento del aislamiento térmico en cubiertas, recirculación para prevenir la estratificación térmica del agua e inspección de los revestimientos protectores contra la radiación solar y salinidad.

La periodicidad de inspección en Australia se establece entre dos y cinco años dependiendo de las dimensiones del depósito.

Tabla 1. Relación con la frecuencia de inspección de Depósitos en diferentes países. Fuente: Elaboración propia

País	**Documento de referencia**	**Frecuencia de inspección**
España	R-20	Anual
Estados Unidos	AWWA M28 Cap. 3 / AWWA C651	Visual: Mensual Exhaustiva: 3 o 5 años dependiendo de la capacidad
Alemania	DVGW W 400-3 Sec. 6 / W 320	Visual: Semestral Exhaustiva: 1 a 3 años dependiendo de la capacidad
Reino Unido	WRc WMRM Cap. 4	Visual: Semestral Exhaustiva: 1 a 3 años dependiendo de la capacidad
Japón	JWWA Transmission Sec. O&M	Visual: trimestral Exhaustiva: 1 año o terremoto de gran magnitud
Australia	WSA 03 Part 2 (O&M Sec.)	Visual: anual Exhaustiva: 2 a 5 años dependiendo de la capacidad

3.3.2. Mantenimiento de tuberías de agua a presión

- **España**

La Guía CEDEX R-13 (*Recomendaciones para el diseño, construcción, puesta en servicio y mantenimiento de tuberías de agua a presión*) es la guía de referencia técnica en España para la aducción y grandes tuberías. Cubre desde la selección de materiales (hierro dúctil, hormigón, acero, plásticos) hasta la protección contra la corrosión, el fenómeno del golpe de ariete, las pruebas de presión en zanjas, el lavado y las maniobras de mantenimiento operativo.

- **Estados Unidos**

A diferencia de un documento genérico único, la AWWA de Estados Unidos divide el mantenimiento y diseño de la aducción a presión según el material de la tubería y también establece estándares de puesta en servicio. Las normas redactadas son M11 para tuberías de acero, M41 para la fundición dúctil, M9 para el hormigón (incluido el hormigón armado y el hormigón con camisa de chapa) y el M23 para los PVC.

Para la rehabilitación y limpieza de las tuberías se emplea la norma M28 en las que se indican técnicas de rehabilitación, raspado/limpieza mecánica (pigging) y rehabilitación del revestimiento interior con mortero cementoso o epoxi en grandes conducciones. Para la desinfección de las tuberías se emplea la norma ANSI/AWWA C651 en las que se recogen las especificaciones técnicas para el lavado, hipercloración, purga y control bacteriológico de tuberías de presión antes de la puesta en servicio.

- **Alemania**

En Alemania, el marco regulatorio para grandes tuberías de transporte a presión está recogidas por las normas DVWG W400 Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen - TRWV, las mismas que para los depósitos de almacenamiento de agua potable, dividiéndose en tres documentos: la W 400-1 se centra en la planificación y el diseño de arterias y redes de distribución a presión; la W 400-2 contiene el procedimiento constructivo y los diferentes controles de calidad y pruebas de presión para la puesta en servicio de la red; y por último, la W 400-3 que versa sobre la operación y

mantenimiento de las redes de distribución a presión, guiando y estableciendo criterios para la inspección de fugas o la protección catódica.

- **Reino Unido**

Reino Unido establece el mantenimiento de las tuberías a presión combinando guías de rehabilitación con especificaciones operativas de ingeniería civil, sin tener una guía específica para el mantenimiento de las tuberías. El *WRc - Water Mains Rehabilitation Manual (WMRM)* contiene aspectos respecto al mantenimiento y el diagnóstico de las tuberías. La guía *CESWI (Civil Engineering Specification for the Water Industry) - Sección 3 (Pipelines)* indica las especificaciones para realizar las pruebas de presión, desinfección y llenado controlado de las tuberías para su puesta en funcionamiento.

- **Japón**

Los japoneses, debido a sus condiciones de contorno y riesgo a sufrir terremotos de gran impacto, desarrollan la guía *JWWA Design Criteria & Maintenance Guidelines for Transmission Pipelines*, centrada en establecer los criterios para hacer resistentes a las tuberías frente a episodios sísmicos. Para ello especifica las propiedades de las juntas flexibles y antisísmicas, la inspección ultrasónica o electromagnética de las paredes de la tubería una vez ocurrido un terremoto o la detección ultrasónica de fugas de grandes conducciones a alta presión.

- **Australia**

En Australia, al igual que Reino Unido, no tienen una guía o normativa que abarque el mantenimiento de las tuberías a presión, centrándose en la puesta en servicio mediante el código *WSA 03 - Part 2 (Construction, Testing and Commissioning of Pressure Pipelines)* el cual regula las pruebas de presión o el control de los golpes de ariete en la red de distribución por la instalación de algún equipo de bombeo o grupo de presión.

Tabla 2. Relación con la frecuencia de campañas de localización de fugas en diferentes países. Fuente: Elaboración propia

País	Documento de referencia	Frecuencia de localización de fugas
España	Guía R-13 (Cap. Mantenimiento)	No especifica
Estados Unidos	AWWA M28 Cap. 3 / AWWA C651	Según funcionamiento de la red
Alemania	DVGW W 400-3 Sec. 6 / W 320	1 a 3 años
Reino Unido	WRc WMRM + CESWI Sec. 3	Según roturas en la red
Japón	JWWA Transmission Pipelines Guide	Anual o terremoto de gran magnitud
Australia	WSA 03 Part 2 / WSA 01	No especifica

3.3.3. Mantenimiento de las válvulas de seccionamiento

- **España**

Para el mantenimiento de las válvulas de seccionamiento en España no existe guía o recomendación técnica unificada como las guías elaboradas por el CEDEX, por lo que se han tomado como referencia otras guías y normas del mundo.

- **Estados Unidos**

El Capítulo 5 del Manual AWWA M-44 (*Operations and Maintenance*) de Estados Unidos se centra en el mantenimiento preventivo y operativo de las válvulas de distribución. Establece protocolos para programas de maniobras de válvulas, control del par de apriete para prevenir la rotura del husillo, inspección del cuerpo de las válvulas, juntas, engranajes y registro del estado en el momento de la revisión (giros de apertura/cierre y estado).

Establece un periodo de revisión de un año para las válvulas críticas (grandes arterias, entradas y salidas de depósitos con gran capacidad) y de dos a cinco años para las válvulas que no son críticas.

- **Alemania**

En Alemania, los documentos de referencia para el mantenimiento de las válvulas son la DVGW W 392 (*Betrieb und Instandhaltung von Wasserverteilungsanlagen*) y en la DVGW W 400-3 (*Betrieb und Instandhaltung*). En ellas se recogen como realizar el par de apriete, definiendo los límites de torque para evitar el descabezado o la deformación del husillo, la revisión del cuerpo y de los prensaestopas y el registro del estado en el momento de la revisión, al igual que la normativa americana (número de giros de cierre, sentido de cierre, par de apriete alcanzado y medido con una llave dinamométrica o la alineación del husillo para una correcta apertura y cierre de la válvula).

El periodo de revisión de las válvulas en Alemania se establece entre un año para válvulas críticas y tres años para las redes secundarias.

- **Reino Unido**

Reino Unido se guía en el mantenimiento de válvulas con el código BS 5163 Part 2 (*Code of practice for inspection, maintenance and operation of valves*). En el código se hace hincapié en la verificación del sentido de cierre de las válvulas (cierre horario/cierre antihorario) debido al diseño y elaboración de válvulas con sentido de cierres distintos a lo largo de la historia (esta problemática también se extiende a otros países europeos, principalmente a finales de la década de los 70-80 y en el que las válvulas inglesas con cierre antihorario tenían un gran mercado). También establece como realizar los engrases de las cajas de engranajes de las válvulas de gran diámetro (principalmente de tipo mariposa), comprobación del alojamiento donde se ubica la válvula, si tiene buen estado estructural, posee de un pozo de achique para extraer el agua o la válvula se puede maniobrar correctamente desde el registro. Entre otros puntos, condiciona los planes de mantenimiento de las

válvulas a un programa de sectorización de la red de distribución, para que en el momento de la comprobación del funcionamiento de la válvula mediante su apertura y cierre, no altere el régimen de presiones ni de caudales en la red que da servicio o que provoque problemas de turbideces en los domicilios.

El periodo de revisión depende del modelo de sectorización de la red de distribución, por lo que oscila entre el año y los tres años.

- **Japón**

En Japón, la guía de mantenimiento es igual a la del resto de elementos analizados en esta parte del documento, la *JWWA Guidelines for Waterworks Maintenance and Management (Cap. Valves)*. Como se ha mencionado anteriormente, los efectos sísmicos tienen una gran relevancia en las inspecciones y mantenimiento de los equipos. Hay establecidas inspecciones después de un evento sísmico de gran magnitud y se realizan obligatoriamente simulacros y maniobras rutinarias para poder aislar tramos por si se produce una rotura fortuita en la red a causa de un terremoto. Las válvulas de seguridad de cierre automático (Emergency Shut-off Valves) tienen un plan de mantenimiento específico y exhaustivo, revisando y realizando trabajos de mantenimiento periódicos en sus subsistemas (sistema de disparo sísmico, actuadores eléctricos para cierre en salida o entrada de depósitos…). Otro de los aspectos relevantes es el establecimiento de pautas para la realización de los mantenimientos de las válvulas sin interrumpir el servicio sin tener que realizar cortes de suministro.

El periodo de revisión de las válvulas es de 1 año máximo, reduciéndose dicho periodo para las válvulas de cierre automático (inferior a un año) o frente a un evento sísmico relevante.

- **Australia**

En Australia, al igual que el resto de elementos analizados, se emplea el código WSAA WSA 03 - Part 3 (Sección Appurtenances & Maintenance). En ella se establece un plan de mantenimiento específico para las válvulas con actuadores de cierre automático por sobrepresiones o subpresiones. De igual forma, indica el establecimiento de un plan de protección catódica para evitar la corrosión de las válvulas, tanto del cuerpo como de las piezas auxiliares (tornillos, bridas…).

Para establecer el periodo de revisión de los elementos, se emplean algoritmo y modelos hidráulicos que determinan la criticidad y el riesgo de fallo de las válvulas, asignándoles un periodo de revisión entre el año y los cinco años.

Tabla 3. Relación con la frecuencia de revisión de válvulas en diferentes países. Fuente: Elaboración propia

País	Documento de referencia	Frecuencia de revisión de válvulas
España	No hay	-
Estados Unidos	M-44 / Cap. 5	Críticas: 1 año Secundarias: 2-5 años
Alemania	DVGW W 392 / W 400-3	Críticas: 1 año Secundarias: 3 años
Reino Unido	BS 5163-2	De 1 a 3 años en función del modelo hidráulico
Japón	JWWA Guidelines (Cap. Valves)	Anual o terremoto de gran magnitud
Australia	WSA 03 (Part 3)	De 1 a 5 años en función del modelo hidráulico

3.3.4. Mantenimiento de las válvulas de aireación

- **España**

Al igual que las válvulas de seccionamiento o los hidrantes, España no posee una guía técnica en la que recoja aspectos de las operaciones de mantenimiento a realizar por las empresas gestoras, basándose el plan de mantenimiento en las especificaciones técnicas y recomendaciones que incluya el proveedor del equipo.

- **Estados Unidos**

En Estados Unidos, el manual AWWA M51 (Air-Release, Air/Vacuum, and Combination Air Valves), el Capítulo 6 (Inspection, Maintenance, and Field Testing) recoge las operaciones de mantenimiento a realizar en una válvula de aereación. Entre ellos se encuentran el desmontaje y la limpieza de los mecanismos en el interior del elemento, realización de prueba de cierre y realización de purga de aire para comprobar el correcto funcionamiento del mecanismo de admisión y expulsión de aire y del purgador para evacuar las pequeñas burbujas de aire. A su vez, también es necesario comprobar el funcionamiento de la válvula previa de seccionamiento y el estado de esta (comprobar que no esté cerrada). Otro de los aspectos relevantes es la comprobación de los registros donde se alojan las ventosas. Estos deben estar vacíos, sin agua, ya que, si la ventosa tiene que admitir aire por un vaciado de la tubería, metería el agua del registro pudiéndose registrar problemas de calidad en el suministro de agua.

El periodo establecido para la revisión de las ventosas es entre 1 y 2 años.

- **Alemania**

En Alemania las guías DVGW W 400-3 (Sección Lüftungs- und Entlüftungsventile) & DVGW W 334 recogen las tareas a realizar en las labores de inspección y de mantenimiento de las ventosas. Principalmente se centran en evitar la intrusión de aerosoles, polvo o agua en el momento de que la ventosa requiera la aspiración de aire hacia la conducción, para ello, se revisan las tomas de aire de los alojamientos para comprobar que el estado de las mallas anti insectos se encuentren correctamente y no haya intrusión de agua desde el exterior. En el mantenimiento que se requiera el desmontaje de la válvula, las guías indican la desinfección de los componentes interior de la ventosa con productos desinfectantes que sean compatibles con la potabilidad del agua.

El periodo establecido para la revisón de las ventosas en Alemania es de 6 meses.

- **Reino Unido**

En Reino Unido, la norma que regula el mantenimiento de las válvulas de aireación es la CESWI Section 5 (Air Valves - Inspection and Operation). En ella se indica que en la revisión del elemento se compruebe el estado de los elementos que componen la ventosa (sobre todo del purgador y de

la válvula de seccionamiento previa a la ventosa). En el desmontaje de la ventosa se debe de registrar el par de apriete de la parte superior (tapa o gorro en función del modelo de la ventosa) y comprobar que el par de apriete es el adecuado para evitar deformaciones en la brida de la ventosa ante un evento de golpe de airete. Otro de los aspectos es la comprobación de la posición de la ventosa junto a equipos de medición como son caudalímetros o contadores, ya que la ubicación de la ventosa puede distorsionar las mediciones registradas por los equipos de medición.

El periodo establecido para la revisión de las ventosas es de 1 año (anual).

- **Japón**

En Japón, el manual empleado para la revisión y establecimiento de los planes de mantenimiento de las ventosas es la JWWA B 137. Al igual que el resto de los manuales empleados en Japón, se hace especial mención a la revisión de los elementos que pueden sufrir más por efecto de los terremotos. Es el caso de las juntas elásticas ubicadas en las bridas entre la ventosa y la válvula de seccionamiento o la calibración del mecanismo de cierre lento para evitar sobre golpes de ariete y del disco de apoyo del mecanismo de flotación para la admisión o cierre de la ventosa.

El periodo establecido para la revisión de las ventosas es anual o tras un terremoto de gran magnitud.

- **Australia**

En Australia, la guía para revisión de ventosas es la *WSAA WSA 03 - Part 3 (Sección Air Release and Vacuum Valves O&M)*. La guía se centra en la protección de la ventosa frente a agentes climáticos en las zonas áridas, para ello indica la revisión del registro y la limpieza de la ventosa mediante el desmontaje de esta. A su vez, es necesario la revisión y comprobación del correcto funcionamiento de las mallas de protección en la toma de aire del registro donde se ubica la ventosa. En las ventosas exteriores, se añade el requisito de revisar las juntas elastoméricas entre bridas y dentro del propio cuerpo de la ventosa debido a la radiación solar directa y la consecuente degradación del material. Otro aspecto relevante es la comprobación del orificio de purga de la ventosa con una aguja calibrada estando la ventosa en servicio.

El periodo de mantenimiento para las ventosas en Australia es de 1 año (anual).

Tabla 4. Relación con la frecuencia de revisión de ventosas en diferentes países. Fuente: Elaboración propia

País	Documento de referencia	Frecuencia de revisión de válvulas
España	No hay	-
Estados Unidos	AWWA M-51 / Cap. 6	1 a 2 años
Alemania	DVGW W 400-3 / W 334	Semestral
Reino Unido	CESWI Sec. 5 (Air Valves)	Anual
Japón	JWWA B 137 / Maint. Guide	Anual o terremoto de gran magnitud
Australia	WSA 03 Part 3 (Air Valves)	Anual

3.4. Sostenibilidad de los activos

3.4.1. Cuantificación e informe de emisiones de gases de efecto invernadero

3.4.1.1. Familia de las UNE EN USO 14060

La familia de normas UNE-ISO 14060 combina normas técnicas internacionales (adaptadas en España por UNE/AENOR) centradas en la medición, reporte, verificación y gestión de gases de efecto invernadero (GEI) y huella de carbono.

Su objetivo principal es asegurar que las empresas, proyectos y productos tengan claridad, transparencia y coherencia al cuantificar su impacto climático, así como hacerlos neutros en carbono, midiendo su impacto en el cambio climático y avanzando hacia la neutralidad de carbono.

La familia se divide en siete normas las cuales permiten medir las emisiones a nivel de organización (UNE-EN ISO 14064-1), proyecto (UNE-EN ISO 14064-2) o producto (UNE-EN ISO 14067); verificar y acreditar las emisiones de gases de efecto invernadero sean veraces (UNE-EN ISO 14064-3, 14065, 14066) e indicar una serie de directrices para alcanzar objetivos como la neutralidad climática (UNE-EN ISO 14068-1)

3.4.1.2. UNE-EN ISO 14064-1:2019. Orientación, cuantificación e informe de las emisiones GEI para organizaciones

La norma UNE-EN ISO 14064-1:2019 establece principios y requisitos para cuantificar y comunicar el inventario de gases efecto invernadero a nivel organizativo teniendo en cuenta pertinencia, integridad coherencia exactitud transparencia; esto es necesario primero definir los límites organizativos (control o cuota participación) y estructurar las emisiones en seis categorías desde directas e importación energía hasta transporte productos utilizados uso productos vendidos otras fuentes indirectas.

El cambio metodológico más importante de esta versión es que las organizaciones tienen que evaluar todas sus emisiones indirectas por criterio técnico u operativo de significancia para obligatoriamente incluir aquellas relevantes en lugar de opcionalmente, cuantificar cada flujo con datos actividad y factores emisión expresados en toneladas de dióxido de carbono equivalente según los potenciales de calentamiento del IPCC manejando la incertidumbre asociada; establecer un año base para comparaciones temporales y preparar el informe para su posterior verificación bajo norma ISO 14064-3.

Anexo clave será el F, en el cual se basará la confección y diseño del informe de emisiones GEI.

Formato recomendado para la declaración consolidada de emisiones de GEI (los valores proporcionados son sólo para fines ilustrativos)

EMPRESA QUE INFORMA	NOMBRE
Persona o entidad responsable del informe	NOMBRE CONTACTO
Periodo de informe registrado	desde MM/DD/AAAA a MM/DD/AAAA
Límites de la organización	Documento adjunto
Límites de informe	Documento adjunto

	EMISIONES	Notas	20xx CO_2e TOTAL (Toneladas p.a)	Dióxido de carbono (CO_2)	Metano (CH_4)	Óxido nitroso (N_2O)	Hidrofluorocarbonos (peso promedio) (HFCs)	Toneladas de perfluorocarbonos (peso promedio) (PFCS)	Hexafluoruro de azufre (SF_6)	Trifluoruro de nitrógeno (NF_3)	Incertidumbre cuantitativa	Incertidumbre cualitativa
			GWP	1	30	265	5 000	4 000	23 500	16 100		
1	**Categoría 1: Emisiones y remociones directas de GEI en toneladas CO_2e (1)**		**83 205**	**83 050**	**149**	**6**	**0**	**0**	**0**	**0**		
1.1	Emisiones directas provenientes de la combustión estacionaria		2 050	2 050	0	0	0	0	0	0	7 %	
1.2	Emisiones directas provenientes de la combustión móvil		81 005	81 000	5	0	0	0	0	0	7 %	
1.3	Procesos directos de emisiones y remociones que surgen de procesos industriales		0	0	0	0	0	0	0	0		
1.4	Emisiones fugitivas directas causadas por la liberación de GEI en sistemas antropogénicos		0	0	0	0	0	0	0	0		
1.5	Emisiones y remociones directas provenientes del uso del suelo, cambios en el uso del suelo y silvicultura		0	0	0	0	0	0	0	0		
Emisiones directas en toneladas de CO_2 a partir de biomasa			**718**	718								

Figura 11. Formato recomendado para declaración consolidada de emisiones GEI, AENOR, 2019

3.4.1.3. UNE-EN ISO 14067 Ciclo de vida del producto

La UNE-EN ISO 14067 (Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos. Requisitos y directrices para la cuantificación) es la norma técnica internacional que establece los principios, requisitos y directrices para medir y reportar exclusivamente el impacto en el cambio climático de un bien o servicio específico a lo largo de su ciclo de vida. Se basa en las normas internacionales de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), principalmente ISO 14040 e ISO 14044.

La Norma marca dos claves: requiere que especifiquemos la unidad de referencia cuantitativa exacta para que todos los cálculos y resultados se expresen, asegurando que sean trazables, consistentes y comparables; y que se establezca la delimitación de las etapas del producto que deban ser auditadas e incluidas en el inventario.

Para el cálculo de las emisiones GEI establece los siguientes pasos:

1) Definición del producto, selección de los límites del sistema, hipótesis del trabajo, criterios de corte y requisitos de calidad de los datos.

2) Análisis del Inventario (LCI): Recopilación y cuantificación de todas las entradas (materias primas, combustibles, energía) y salidas (emisiones, residuos) referidas a la unidad funcional.

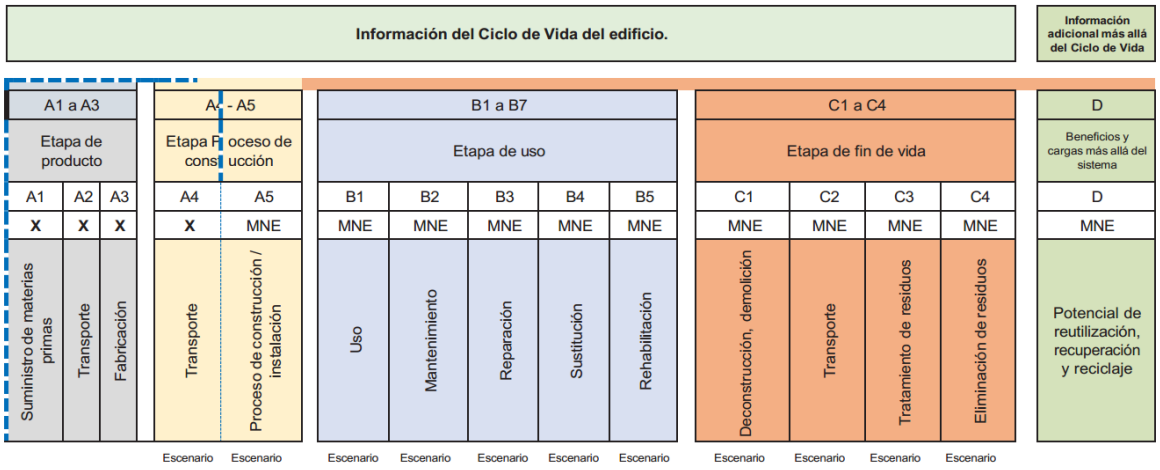


Figura 12. Etapas del ciclo de vida - ANEFHOP, 2022

3) Evaluación del Impacto (LCIA): Conversión de las cantidades de los distintos GEI a una unidad común: kilogramos de CO2 equivalente ($kgCO_{2eq}$) utilizando los factores potenciales de calentamiento global (GWP) estandarizados a 100 años por el IPCC.

4) Identificación de los puntos críticos de emisión, evaluación de la incertidumbre y redacción del informe de la Huella de Carbono del Producto (HCP).

El cálculo de los GEI para el HCP obliga a calcular y reportar el consumo eléctrico mediante dos enfoques diferenciados: el método basado en la localización (promedio del mix eléctrico de la red) y el método basado en el mercado (contratos específicos, garantías de origen o autoconsumo). A su vez, siguiendo las directrices del IPCC, el informe exige la inclusión explicita de las emisiones derivadas de las transformaciones del suelo vinculadas a la obtención de las materias primas para el producto (LULUCF). Por último, se debe tener en cuenta el tratamiento al fin de la vida útil del producto, estableciendo unas reglas para contabilizar las cargas o beneficios ambientales derivados del reciclaje, la reutilización o la valorización energética.

La norma culmina con la elaboración del Informe de la Huella de Carbono del Producto (HCP), documento que debe detallar con total transparencia las hipótesis adoptadas, las fuentes de datos primarios y secundarios utilizadas y el análisis de sensibilidad, sirviendo como soporte técnico verificable.

3.4.2. Obtención de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)

Para el cálculo de los factores de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes atmosféricos en España, la selección del origen de datos puede venir de diversas fuentes:

3.4.2.1. IPCC EFDB (Emission Factor Database)

La base de datos EFBD está distribuida por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) y se encuentra gestionada y mantenida por dos organismos: el TFI (Task Force on National Greenhouse Gas Inventories) y el IGES (Institute for Global Environmental Strategies)

Su creación y difusión fue en el año 2002, después de su aprobación en la 19ª Sesión del IPCC tras los desarrollos iniciados en 2001.

La publicación de esta base de datos se lanzó con el objetivo de servir de repositorio global interactivo y centralizado de factores de emisión y parámetros de conversión revisados por expertos. Estos factores y parámetros facilitan a todos los países la elaboración de sus inventarios nacionales de emisiones de GEI (la familia de las normas UNE 14060, hace referencia constante a los datos publicados por el IPCC).

3.4.2.2. Declaraciones Ambientales de Producto (EPD)

Las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD o DAP en español) son documentos que miden el impacto ambiental de un material u otro producto a lo largo de su ciclo de vida: desde la extracción de materias primas y fabricación hasta transporte, uso y fin de vida se cuantifican parámetros estandarizados (GWP, consumo energético o agotamiento de recursos). Su alta fiabilidad se debe a que son desarrollados obligatoriamente bajo normas técnicas estrictas (ISO 14025 y Reglas de Categoría de Producto específicas), así como que siempre requieren una auditoría externa antes de su publicación oficial.

Se pueden consultar en registros oficiales reconocidos internacionalmente como el International EPD System, programa GlobalEPD de AENOR en España, Institut Bauen und Umwelt (IBU) Alemania o plataformas centralizadas como ECO Platform y

3.4.2.3. Base de Datos de Factores de Emisión (MITECO)

En el año 2014, bajo el marco legal del Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, que regula el Registro de Huella de Carbono, Compensación y Proyectos de Absorción de CO_2, el actual Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) a través de la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) publica esta base de datos con el objeto de desarrollar una herramienta oficial y adaptada al contexto nacional para el cálculo de la huella de carbono a distintas organizaciones, empresas y administraciones y ofrecer factores de emisiones actualizados anualmente en el contexto nacional, especialmente en el ámbito de la energía eléctrica y combustibles.

3.4.2.4. Guía EMEP/EEA (AEMA)

Antes de la creación de la EFDB por parte del IPCC, la Unión Europea a través de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) en colaboración con el programa EMEP (*Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe, dependiente de la UNECE*) publica en 1996 la primera versión del manual de inventarios de emisiones (originalmente *EMEP/CORINAIR Guidebook*). Esta publicación nace con el objetivo de ayudar a los países que conforman la Unión Europea a cumplir con sus obligaciones de reporte bajo la Directiva de Techos Nacionales de Emisión (NECD) y el Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia (CLRTAP).

El manual, que es actualizado periódicamente como el *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook,* provee metodologías unificadas y factores de emisión armonizados para contaminantes atmosféricos (NO_x, SO_2, partículas…).

3.4.3. Real Decreto 21/2025, de 18 de marzo. Registro de huella de carbono

A raíz de la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de Cambio Climático y Transición Energética, estableció en a través de la Disposición Final Duodecima, la necesidad del cálculo y publicación de la huella de carbono de las empresas con actividad en el territorio nacional. Esta disposición originó la redacción del *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.

Su objetivo principal es obligar a las medianas y grandes organizaciones a medir su impacto ambiental, trazar un plan para reducirlo y registrarlo de forma oficial. Las organizaciones deben de incluir de forma obligatoria los Alcances 1 y 2 de emisiones directa de combustibles y consumo eléctrico. A su vez, deben de redactar un plan de reducción de emisiones con objetivos cuantificados a un horizonte de mínimo 5 años.

4. IDENTIFICACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD

4.1. Identificación de las necesidades

Una vez analizado el contexto actual y el estado del arte de las tecnologías y procedimientos empleados para la integración de la Metodología BIM, la gestión de activos en la fase de operación y mantenimiento y la determinación de la emisión de gases de efecto invernadero se han detectado las siguientes necesidades con respecto a los objetivos planteados:

4.1.1. Redes de abastecimiento envejecidas y sin mantenimiento

La gestión de todo el ciclo del agua se encuentra en una encrucijada en la actualidad en la gestión del ciclo completo del agua. Los gestores de redes están invirtiendo importantes cantidades de recursos técnicos y económicos para modernizar infraestructuras envejecidas, optimizar operaciones y responder a las presiones regulatorias a la luz de la actual emergencia climática. Para resolver este desafío técnico y ambiental multidisciplinar, se necesitan nuevos enfoques de gestión e impacto para abordar este doble desafío técnico y ambiental. Sin embargo, la aplicación real de estas soluciones en el sector del agua presenta importantes deficiencias metodológicas.

4.1.2. Falta de desarrollo de la metodología BIM en el sector del agua

Por un lado, en el campo de la gestión de infraestructuras, los métodos que inicialmente se describieron bajo el estándar de Building Information Modeling (BIM) han demostrado ser efectivos en la fase de planificación y construcción de infraestructuras, teniendo un mayor impacto en la rama de la edificación e infraestructuras de transporte (carreteras y ferrocarril). Sin embargo, su uso en infraestructuras hidráulicas aún está en sus inicios debido la falta de estandarización en el intercambio de datos abiertos (archivos IFC).

Por lo tanto, es importante crear un marco de estandarización en cuanto a la fase de operación y mantenimiento de las infraestructuras hasta el final de su vida útil, en línea con la reciente versión preliminar publicada por el BSI para la serie ISO 19650. Se aprecia un cambio claro en el concepto detrás de las normas ISO 19650-1, 19650-2 y 19650-3 de un modelo 3D a una gestión de información completa e integrada. Estos nuevos requisitos deben anticiparse y los datos deben organizarse desde el inicio del proyecto hasta la operación y mantenimiento a largo plazo de los activos.

4.1.3. La brecha en la evaluación ambiental en las redes de abastecimiento de agua

El otro problema vinculado a la falta de trazabilidad de los datos es la descarbonización. Si bien existen métodos ampliamente utilizados para calcular las emisiones de GEI en plantas de tratamiento, el impacto ambiental de las redes de distribución aún no está bien medido. El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y las directrices como la norma ISO 14064-1 no están teniendo especial impacto para cuantificar las emisiones indirectas de Alcance 2 y 3 de materiales y operación.

4.1.4. Barrera tecnológica en la fase de explotación (integración de GMAO-BIM-GEI).

Además de las deficiencias metodológicas anteriores, existe una barrera tecnológica y económica significativa en la fase de explotación. No existen soluciones de software de acceso abierto o de bajos recursos computacionales y económicos que nos permitan asegurar que los activos modelados con la metodología BIM se integren en un sistema de gestión de activos (GMAO).

Esta desconexión digital se ve agravada por una "ceguera ambiental" operativa: las intervenciones rutinarias y los planes de mantenimiento preventivo en los GMAO tradicionales no tienen en cuenta las emisiones de GEI asociadas con estas operaciones (reemplazo de componentes, uso de maquinaria, etc.). Esta doble deficiencia -la falta de interoperabilidad y la incapacidad de rastrear la huella de carbono del mantenimiento- desalienta a los gestores, haciendo que el esfuerzo técnico y económico inicial para adoptar la metodología BIM sea mucho menos atractivo y justificable.

4.2. Justificación de la necesidad

La falta de mantenimiento efecto en las redes de distribución de pequeña entidad junto a a desconexión entre la gestión estructurada de la información (ISO 19650), la gestión de activos en la fase de explotación y la evaluación del impacto ambiental requiere de una solución para dar respuesta dicha descoordinación.

Por ello, esta investigación es necesaria para tratar de cerrar esta brecha metodológica y tecnológica con un flujo de trabajo que integra la estructuración de datos estandarizados con el cálculo de las emisiones de GEI, y que puede implementarse en entornos de bajos recursos. Permirá diseñar planes de mantenimiento que sean operativamente eficientes pero que también midan su impacto ambiental, destacando así el BIM como una inversión clave para la neutralidad climática.

5. PROPUESTA METODOLÓGICA

5.1. Fase I: Inventario de la red

En primer lugar, será necesario analizar los datos que existan sobre la red de abastecimiento a gestionar para incluirlo en el Sistema. Debido a la gran variedad de inventarios pueden encontrarse distintos escenarios:

- Escenario 1: un inventario completo, georreferenciado y con los datos técnicos de los elementos de la red,

- Escenario 2: inventario incompleto, georreferenciado, pero sin la totalidad de los datos técnicos de los elementos de la red.

- Escenario 3: Inventario incompleto, sin georreferenciar, pero con la totalidad de los datos técnicos de los elementos de la red.

- Escenario 4: Inventario incompleto, sin georreferenciar y sin la totalidad de los datos técnicos de los elementos de la red.

5.1.1. Escenario 1. Inventario completo, georreferenciado y datos técnicos completos

Se trata del mejor escenario ya que solo sería necesario un trabajo de gabinete y dependiendo de los formatos en los que se encuentre la información (Formatos GIS como GeoPackage GPKG o Geodatabase GDB, ficheros CAD con datos sin asociar en ficheros XLS, XLSX o MDB) la transición al formato a emplear con esta metodología (GeoJSON) sería relativamente rápida.

5.1.2. Escenario 2. Inventario incompleto, georreferenciado y datos técnicos completos

Cuando el inventario se encuentra incompleto hay que realizar trabajos de campo para levantar los elementos y poder obtener sus datos y combinarlos con los trabajos de gabinete. Dependiendo de la técnica que se emplee para la obtención de los datos en campo y la densidad de elementos en un ámbito geográfico determinado se pueden obtener tiempos dispares.

En el caso que ocupa en este estudio, se ha propuesto el empleo de fichas de datos telemáticas mediante aplicaciones OpenSource como es QField for QGIS. Esta aplicación permite el levantamiento de diferentes tipos de objetos espaciales (líneas – tubos, puntos – valvulería, polígonos – depósitos, edificios de bombeo) y el registro de los datos mediante un dispositivo móvil.

El registro de datos realizado es interesante ya que se puede configurar, preparando un formulario con datos cerrados o con reglas que permiten una mayor higiene del dato (ya que no permite introducir datos erróneos o avisa a la persona encargada del levantamiento que los datos que está introduciendo no son correctos).



Figura 13. Editor de mapas de valores de QField. QField

Estos datos, una vez almacenados en el dispositivo móvil se pueden pasar a la aplicación de escritorio QGIS teniendo el ordenador próximo o mediante la conexión a un servidor. Para el alcance de este estudio se ha optado por la transferencia de información de proximidad sin configurar el servidor, pero se puede realizar que la carga de datos sea directamente al CDE a través de la configuración de una API que permita la edición de los archivos GeoJSON que sirven de base de datos para el CDE.

En este caso, para tener todos los campos necesarios para que el AIM se han configurado los siguientes formularios de atributos:

Tabla 5. Esquema de datos de los archivos GeoJSON necesarios para la incorporación al CDE. Elaboración propia

Entidad (Tipo Elemento)	**Nombre**	**Tipo**	**Longitud**	**Obligatorio**
Bomba	ID Bomba	Texto (String)	20	SI
	Descripción	Texto (String)	100	NO
	Etiqueta	Texto (String)	20	NO
	Cota (m)	Decimal (Real)	0	NO
	Marca	Texto (String)	50	SI
	Modelo	Texto (String)	50	SI
	Fecha Instalación	Fecha (Date)	0	NO
	Potencia (kW)	Decimal (Real)	0	NO
	Velocidad relativa (rpm)	Entero (Integrer)	0	NO
Valvula	ID Valvula	Texto (String)	20	SI
	Descripción	Texto (String)	100	NO
	Etiqueta	Texto (String)	20	NO
	Cota (m)	Decimal (Real)	0	NO
	Estado	Texto (String)	50	SI
	Tipo	Texto (String)	20	SI
	Marca	Texto (String)	50	SI
	Modelo	Texto (String)	50	NO
	Fecha Instalación	Fecha (Date)	0	NO
Tuberia	ID Tubo	Texto (String)	20	SI
	Descripción	Texto (String)	100	NO
	Etiqueta	Texto (String)	20	NO
	Cota (m)	Decimal (Real)	0	NO
	Longitud	Decimal (Real)	0	NO

Entidad (Tipo Elemento)	Nombre	Tipo	Longitud	Obligatorio
	Diametro (mm)	Entero (Integrer)	0	SI
	Material	Texto (String)	20	SI
	Marca	Texto (String)	50	NO
	Fecha Instalación	Fecha (Date)	0	NO
Deposito	ID Deposito	Texto (String)	20	SI
	Descripción	Texto (String)	100	NO
	Etiqueta	Texto (String)	20	NO
	Cota solera (m)	Decimal (Real)	0	NO
	Numero compartimentos	Entero (Integrer)	0	SI
	Superficie compartimento	Decimal (Real)	0	SI
	Largo compartimento	Decimal (Real)	0	SI
	Ancho compartimento	Decimal (Real)	0	SI
	Alto compartimento	Decimal (Real)	0	SI
	Nivel alivio	Decimal (Real)	0	SI
	Nivel máximo	Decimal (Real)	0	SI
	Nivel mínimo	Decimal (Real)	0	SI

5.1.3. Escenario 3. Inventario incompleto, sin georreferenciar y datos técnicos completos

Al igual que en el Escenario 2, un inventario incompleto y sin georreferenciar obliga a realizar un trabajo de campo. En este caso se propone la misma aplicación de la aplicación QField para ubicar y completar los datos con las directrices dadas en el Escenario 2.

Una vez realizado el levantamiento y disponiendo de los datos técnicos, hay que realizar la comprobación y contrastar con los datos técnicos de los que se dispone para fusionar ambas fuentes de datos y tener un modelo actualizado.

5.1.4. Escenario 4: Inventario incompleto, sin georreferenciar y sin datos técnicos completos

Este es el escenario más desfavorable, en el cual no se dispone de ningún inventario o de lo poco que se dispone no está digitalizado.

En este caso, se propone una combinación de trabajo de gabinete previo, trabajo en campo y trabajo de comprobación en gabinete de la siguiente manera:

1) Digitalización de la cartografía existente, mediante el escaneo de mapas o planos de red existentes, georreferenciar dichos documentos y proceder a vectorizar los elementos representados.

2) Toma de datos en campo con la cartografía digitalizada en el paso 1. Cargar el modelo en la aplicación QField o en otra para tener la cartografía digitalizada en el dispositivo móvil y poder consultarla en campo. Este paso permite un ahorro considerable de tiempo respecto al empleo de cartografía estática en imágenes o documentos.

3) Contrastar la información digitalizada con la tomada en campo mediante levantamiento, comprobando los campos antes de dar por completado el modelo de la red y proceder a su uso en el AIM.

5.2. Fase II: Definición Estratégica (ISO 19650-1)

Una vez inventariada la red, se procede a plantear la estrategia de la implementación de la metodología BIM en el modelo digitalizado.

5.2.1. Requisitos de Información (OIR, AIR, EIR) y Entorno Común de Datos (CDE)

El éxito de la implementación de BIM en infraestructuras hidráulicas en general, así como la integración con un GMAO y los cálculos de Gases de Efecto Invernadero (GHG), se ha de fundamentar en una arquitectura de información adecuada desde el inicio del proyecto. La metodología propuesta se basa en la norma ISO 19650-1 y las nuevas directrices de las revisiones preliminares (BSI, 2026) dándole mayor protagonismo a la base de datos del sistema de gestión de activos y menor relevancia al modelo geométrico.

Para asegurar que los datos generados durante la fase de diseño y construcción sean útiles durante la fase de conservación de la infraestructura (operación y mantenimiento), se han de establecer una serie de requisitos documentales que actúan como directrices contractuales y técnicas.

5.2.1.1. Requisitos de Información de la Organización (OIR - Organizational Information Requirements)

Los OIR representan el nivel más alto de la estrategia de datos. En el contexto de los operadores del ciclo integral del agua, estos requisitos no describen aspectos técnicos del modelo, sino que traducen los objetivos estratégicos y corporativos de la organización en necesidades de información.

En la metodología propuesta para este estudio, los OIR deben recoger explícitamente dos grandes metas organizacionales:

- **Sostenibilidad y Neutralidad Climática**: La necesidad de auditar y reducir la huella de carbono (Categorías 2, 3, 4, 5 y 6 ISO 14064-1:2019) de la infraestructura.

- **Optimización del servicio**: La necesidad de implementar planes de mantenimiento preventivo y predictivo que minimicen las interrupciones del servicio.

5.2.1.2. Requisitos de Información del Activo (AIR - Asset Information Requirements)

Los AIR traducen los objetivos del OIR en parámetros técnicos específicos que la infraestructura debe contener para poder ser operada. Constituyen el núcleo de esta metodología, ya que definen exactamente qué datos debe absorber el posterior Modelo de Información del Activo (AIM) para alimentar al GMAO.

Para el marco metodológico de esta investigación, el documento AIR estipula que todo activo modelado deberá incorporar:

5.2.1.2.1. Parámetros generales

Uno de los requerimientos más críticos definidos en el AIR para garantizar la interoperabilidad semántica entre el modelo BIM y el GMAO es la adopción de una nomenclatura estandarizada. Los sistemas de gestión de mantenimiento no operan con geometrías, sino con bases de datos relacionales y jerárquicas. Por tanto, si los activos hidráulicos se modelan con nombres genéricos o inconsistentes (*Por ejemplo: "Válvula 1", "Tubo_PE"*), la importación automatizada de los datos fracasará, requiriendo un mapeo manual inasumible en redes de grandes dimensiones o con numerosos elementos.

La sintaxis obligatoria que debe reflejarse en los parámetros de identificación del modelo (como el atributo *Tag* de la entidad *IfcRoot*) seguirá la siguiente estructura alfanumérica:

[SISTEMA] / [SUBSISTEMA] / [TIPO DE ELEMENTO] / [ID ÚNICO]

De esta manera, cuando se importe el modelo IFC ante una actualización, modificación o nueva instalación de un elemento de la red y se transforme al formato GeoJSON para el empleo en cualquier visor de datos espaciales (GIS), el GMAO identificará el *tag* y lo clasificará por tipo de elemento de red, entidad OpenBIM (*IfcEntry*) y tipo (*PrefenidedType*), asignándole el plan de mantenimiento correspondiente y preguntando si la subida del elemento implica una actualización cartográfica porque el elemento no se encontraba representado o inventariado en el GMAO, lo cual no supondrá que haya generado emisiones GEI, o su sustitución, en ese caso si se le imputará una emisión de GEI.

5.2.1.2.2. Integración de la codificación AEAS

El AIR exigirá la aplicación de una codificación basada en las guías de clasificación de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) – **AeasBIMClass.v02**. Esta codificación estructurará los elementos mediante una jerarquía lógica que define el sistema, el subsistema, el tipo de componente y su identificador único.

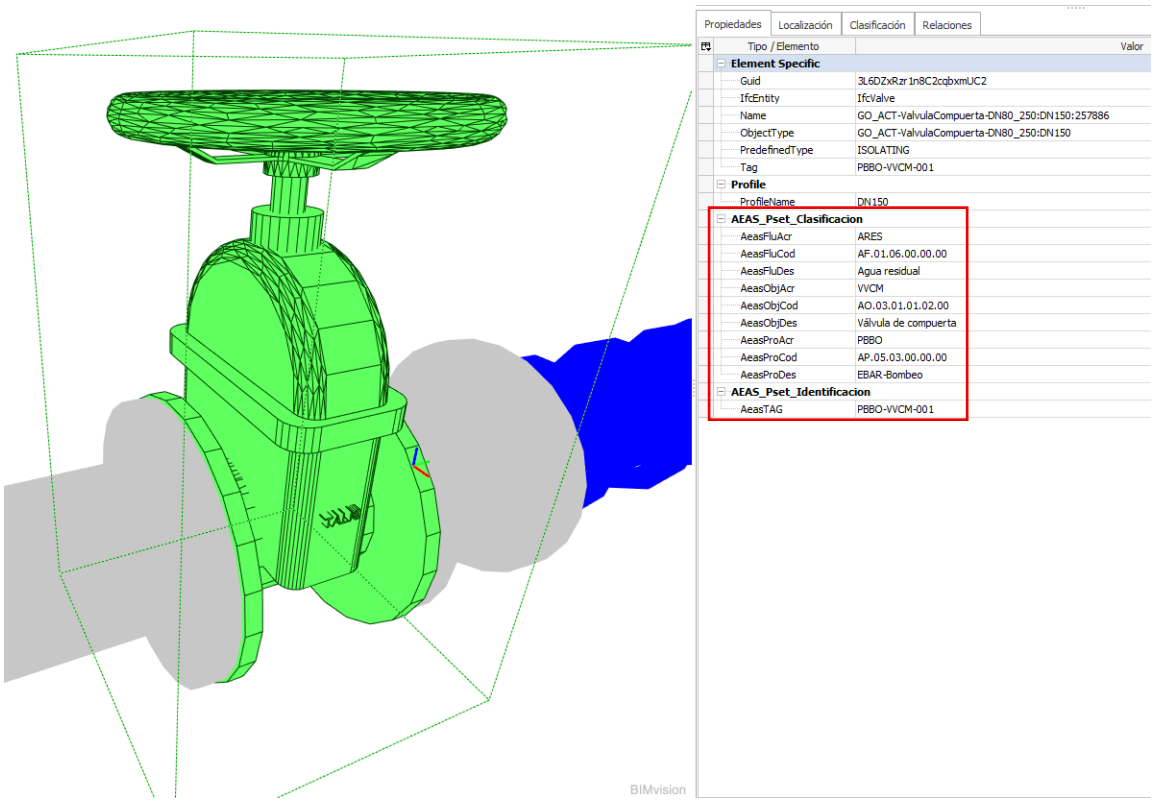


Figura 14. Captura de pantalla de una válvula en la que se observa la clasificación de AEAS. Elaboración propia

5.2.1.2.3. Parámetros de Mantenimiento y Operación

Para que el GMAO pueda registrar todas las operaciones correctamente (el historial médico), el activo a incorporar al sistema debe están clasificados de manera detallada (historial técnico). Para ello, tanto como en la fase de diseño como de incorporación al sistema, el archivo IFC deberá tener metadatos, por lo que, para poder añadir un nuevo modelo al sistema, se prohíbe la incorporación de nuevas geometrías sin metadatos.

El AIR propuesto debe de requerir los conjuntos de propiedades completos (basados en los Conjuntos de Propiedades del estándar IFC4x3), que alimentarán directamente las bases de datos relacionales del gestor de mantenimiento.

Para asegurar que estos parámetros sean útiles para la metodología planteada, en el AIR se tienen que definir reglas de inyección de datos durante la fase de modelado (UNE-EN ISO 19650-2:2020) para evitar fallos o pérdidas de tiempo por añadir la información manualmente.

5.2.1.2.4. Parámetros de sostenibilidad

Para dar cumplimiento a los objetivos de descarbonización y a la norma UNE-EN ISO 14064-1:2019 referida a la huella de carbono de productos, se añade en el AIR la obligatoriedad de documentar y estructurar el impacto ambiental de los elementos constructivos desde su fase de provisión hasta el final de su vida útil y su reconversión o reciclaje.

- **Estructura de Datos ambientales exigida**

Para cada activo físico susceptible de renovación o mantenimiento (tuberías, bombas y valvulería), el modelo deberá cumplimentar obligatoriamente los siguientes parámetros:

Tabla 6. Estructura de los datos ambientales exigida. Elaboración propia

Categoría de parámetros sostenibilidad	**Property Set (Pset)**	**Atributos Obligatorios**	**Detalle atributo**
Trazabilidad ambiental de materiales	Pset_EnvironmentalImpactIndicators	QualityLevelEF	Nivel I, II, II (Booleano)
		QualityDataEF	Específico / Estimado (Booleano)
		ReferenceStandard	Norma EDP

- ***Calidad de los datos de emisiones facilitados***

No todos los elementos implicados en la gestión de activos disponen de un EDP específico certificado. Por ello, establece un protocolo para la asignación de factores de emisión que deberá ser incluido en el campo *QualityLevelEF* del archivo IFC:

- Nivel 1 (Datos Específicos): Uso obligatorio de la EDP del fabricante real del equipo o tubería instalado, garantizando la máxima precisión.

- Nivel 2 (Datos Sectoriales): Uso de EDP sectoriales proporcionadas por asociaciones de fabricantes, aplicables a familias genéricas de componentes (ej. asociaciones de fabricantes de tuberías plásticas).

- Nivel 3 (Bases de Datos Genéricas): En ausencia de EDP, se recurrirá a factores de emisión estandarizados extraídos de bases de datos reconocidas (como los factores publicados por el IPCC, el MITECO o la base de datos Ecoinvent).

En el modelo IFC, se registrará en el atributo *QualityDataEF* el nivel si el dato de emisión es "Específico" o "Estimado".

- ***Referencia Normativa y Verificación (ReferenceStandard) - Nivel 1 y 2 (Datos específicos y sectoriales):***

Se debe indicar el número de registro de la EPD, el programa administrador (*GlobalEPD de AENOR o The International EPD System*). Esto asegura la auditabilidad de los datos frente a futuras certificaciones bajo la norma ISO 14064-1.



Figura 15. Portada de certificado DAP con el código de registro único. GlobalEPD AENOR

5.2.1.3. Requisitos de Intercambio de Información (*EIR - Exchange Information Requirements*)

Mientras que el AIR define "qué" información se necesita, el EIR establece "cómo" y "cuándo" debe entregarse por parte de los gestores o de la empresa encargada de las reparaciones o la explotación de la red de abastecimiento. Es el documento contractual clave para asegurar la interoperabilidad tecnológica tanto de los activos actuales como de los futuros cambios a lo largo de su vida útil.

En esta metodología, el EIR define:

5.2.1.3.1. Formatos de Entrega (OpenBIM) e Interoperabilidad Tecnológica

Para garantizar la viabilidad del proyecto y su accesibilidad a largo plazo, el EIR define las siguientes exigencias técnicas en la entrega de la información:

- **Adopción del Estándar IFC 4**

Se prohíbe la entrega exclusiva de archivos en formatos propietarios de modelado (.rfa, .rvt, .step) para evitar el *vendor lock-in* o necesidad de emplear programas de pago de los que no se disponga de licencia. El entregable oficial será un archivo bajo el estándar IFC (Industry Foundation Classes), exigiendo específicamente la versión **IFC4.3.2.0.** (ISO 16739-1:2024)

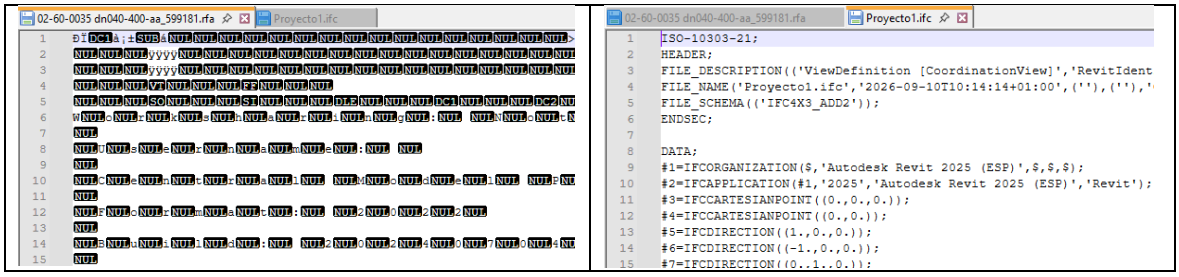


Figura 16. Diferencias de formato y estructura de ficheros con formato propietario (.rfc izquierda) e IFC (derecha). Ep

Esta versión es un requisito estricto, ya que es la primera iteración del estándar de buildingSMART que incorpora de forma nativa dominios, entidades y jerarquías espaciales diseñadas específicamente para infraestructuras civiles, redes lineales e infraestructuras del ciclo del agua.

- **Inyección Programática de Datos y Psets Personalizados**

Para asegurar que los parámetros definidos en el AIR (clasificación AEAS, factores de emisión GEI y vida útil) se integren sin pérdida de información, el EIR promueve la validación del archivo IFC mediante herramientas de código abierto.

En infraestructuras singulares, la exportación estándar suele ser insuficiente. Por ello, se recomienda el uso de librerías como IfcOpenShell mediante rutinas en Python, lo que permite auditar y generar conjuntos de propiedades personalizados (por ejemplo, un Pset_DatosDeposito) directamente en el código fuente del archivo IFC, garantizando la integridad de la base de datos relacional.

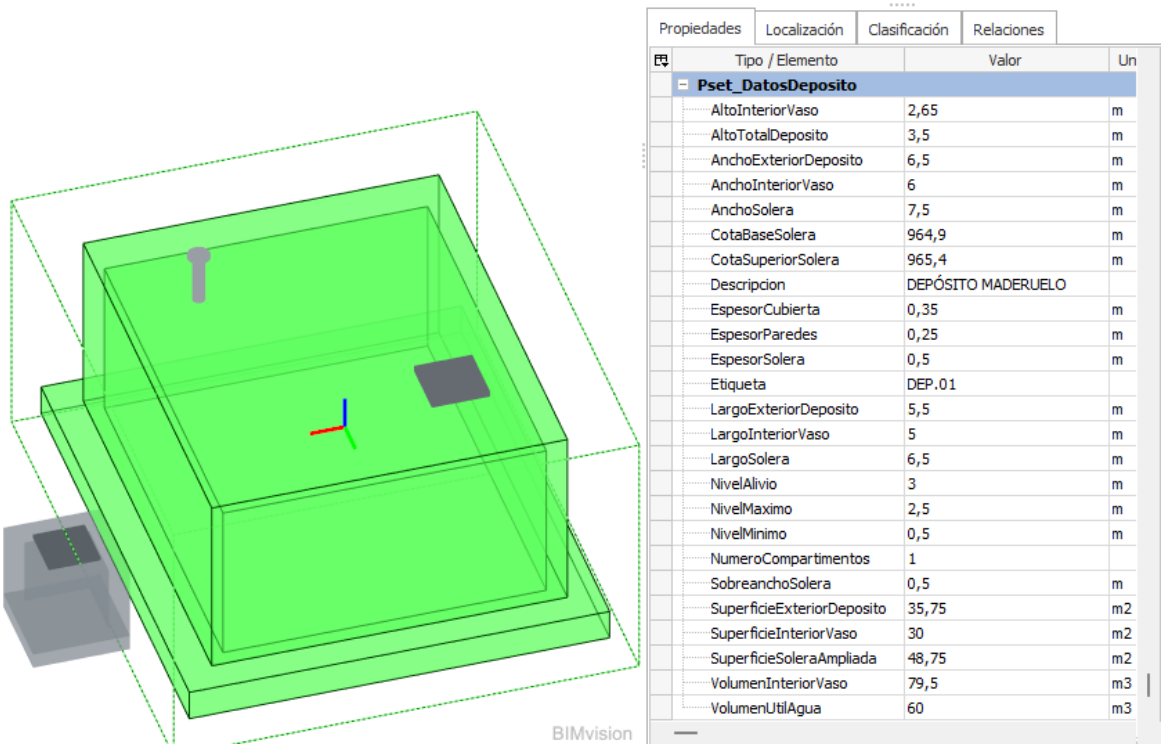


Figura 17. Ejemplo de la creación de Pset personalizados mediante la herramienta IfcOpenShell. Elaboración propia

- **Preparación para la transformación geoespacial**

Se requerirá que el archivo IFC esté correctamente estructurado para permitir extraer su posición espacial a través de sus metadatos para ser convertirlo a formatos vectoriales ligeros, como GeoJSON.

Este paso final es el que habilita la visualización de la red hidráulica en visores cartográficos web (basados en tecnologías como Leaflet) con el módulo de órdenes de trabajo del GMAO.

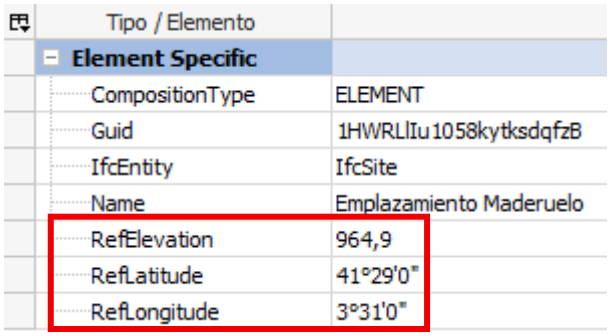


Figura 18. Metadatos de la ubicación (Cota, Latitud y Longitud en el SRC WGS84). Elaboración propia

5.2.1.3.2. Estructura semántica y Data Mapping

Uno de los mayores obstáculos en la interoperabilidad BIM-GMAO es la ubicación arbitraria de la información. Si el EIR no define una estructura semántica estricta, los programas de modelado nativo (como Revit o Civil 3D) exportarán los metadatos a Property Sets genéricos y opacos (ej. Pset_Revit_Mechanical), imposibilitando su lectura automatizada por parte de plataformas externas.

Para evitar este escenario, el EIR exige un Mapeo de Datos (*Data Mapping*) explícito. Todo parámetro requerido en el AIR debe ser mapeado obligatoriamente a las entidades, atributos y Property Sets estandarizados del esquema IFC 4.

Para ello, en la aplicación de la metodología se tendrá que completar la siguiente tabla:

Tabla 7. Matriz de ejemplo de mapeo semántico

Dato requerido	**Entidad y atributo destino**	**Tipo de dato IFC (IFC Data Type)**	**Tipo de dato BBDD**
Identificador único	IfcRoot.GlobalId	IfcGloballyUniqueId	String

5.2.1.3.3. Validación de sintaxis

El archivo en formato IFC (basado en la ISO 16739-1:2024) es una base de datos relacional escrita en texto plano bajo el estándar STEP (*Standard for the Exchange of Product model data*). Debido a ello, la importancia que adquiere la higiene del dato a través de los metadatos es fundamental para que todas las relaciones que puedan basarse en los datos del fichero IFC se realicen sin fallos.

El EIR debe de establecer que exportar desde el software de modelado nativo no es suficiente. Las rutinas de exportación de los programas comerciales a menudo generan errores de sintaxis, variables huérfanas o relaciones topológicas rotas. Si bien algunos visores BIM comerciales pueden autocompletar o ignorar estos errores al abrir el archivo, los motores de extracción automatizados de código abierto (como los basados en IfcOpenShell, que alimentan el sistema GMAO propuesto) interrumpirán el proceso de parseo (parsing) al encontrar cadenas de texto corruptas.

Para mitigar este riesgo, el EIR exige un proceso de auditoría de sintaxis y validación semántica previo a la subida del modelo al Entorno Común de Datos (CDE), centrado en los siguientes aspectos críticos:

- **Prevención y corrección de variables sin unidad (IFCMEASUREWITHOUNIT)**

Uno de los errores de exportación más recurrentes que bloquea la interoperabilidad es la instanciación de la clase IFCMEASUREWITHOUNIT. Este error se produce cuando el software de modelado introduce un valor numérico (*por ejemplo, 15.5 correspondiente a los kg CO_2-eq del factor de emisión, o 10 correspondiente a los bares de presión de una válvula*) pero omite declarar explícitamente en el esquema STEP si se trata de una medida de masa, presión, longitud o un número adimensional.

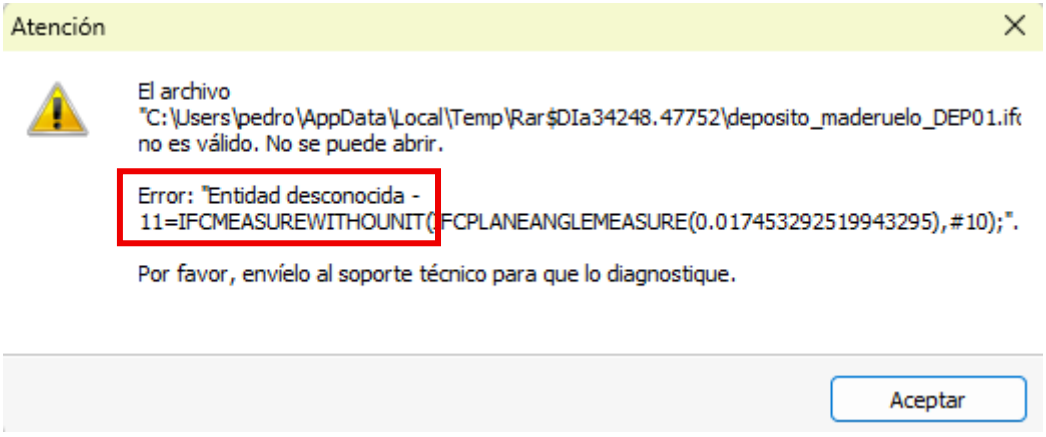


Figura 19. Error IFCMEASUREWITHOUNIT en el programa BIMvision con un archivo no revisado

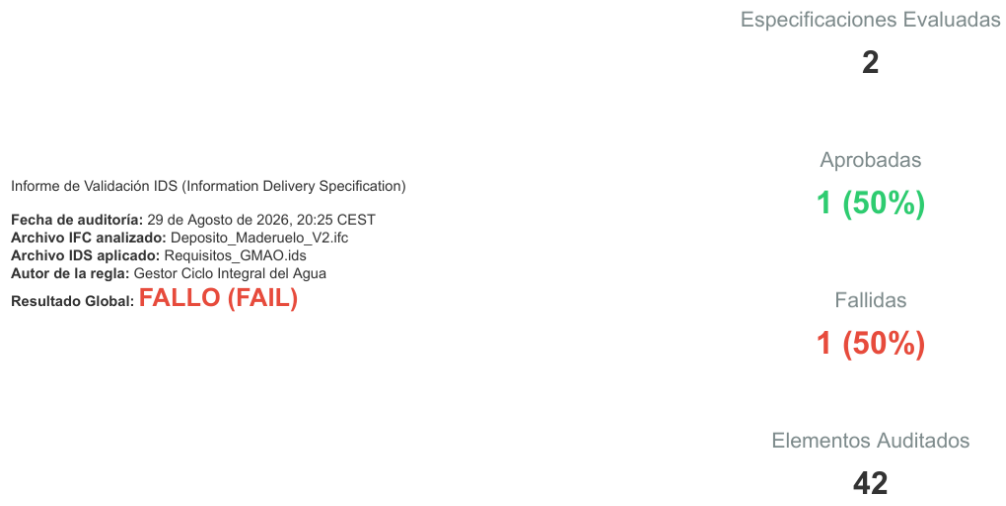
Cuando el script ETL (Extracción, Transformación y Carga) intenta transformar ese dato para enviarlo al visor web (GeoJSON) o al GMAO, el sistema lanza un aviso al no poder validar el tipo de dato.

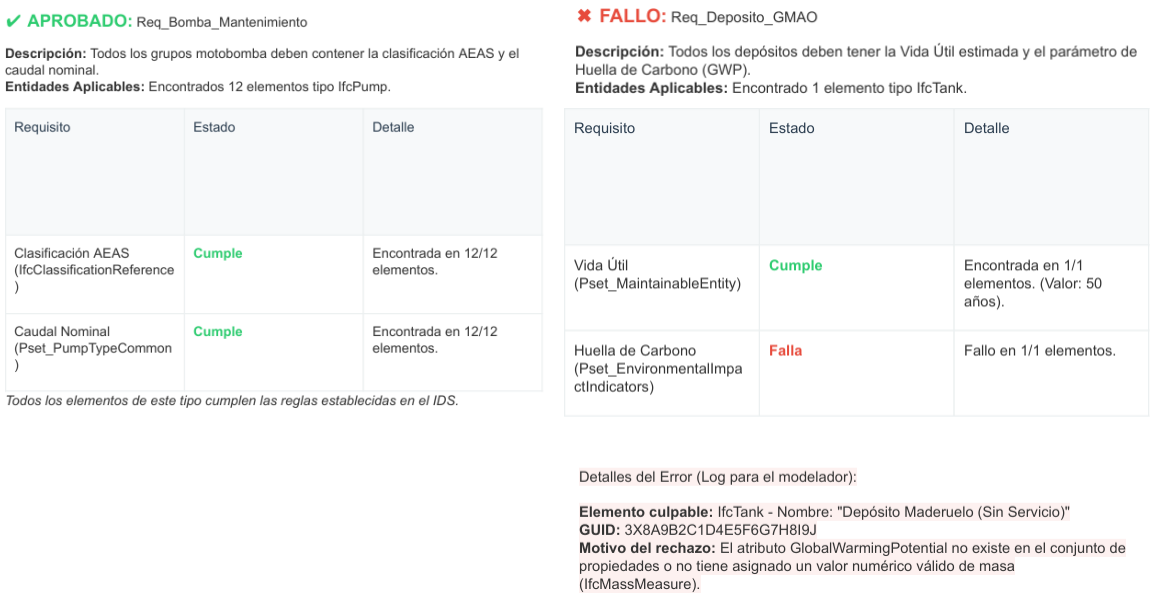
El EIR obliga al modelador a depurar los diccionarios de propiedades (Property Sets) en el software nativo para asegurar que todos los parámetros numéricos se exporten vinculados a la clase correcta (ej. IfcMassMeasure o IfcPressureMeasure).

- **Validación mediante Especificaciones de Entrega de Información (IDS)**

Anticipándose a los requerimientos de los borradores del BSI (2026) sobre la calidad de los datos, el EIR recomienda **abandonar la validación manual de propiedades**.

El IDS es un archivo auditable por ordenador que comprueba automáticamente si el modelo cumple con los AIR. Es decir, el software de validación rastreará automáticamente todas las entidades IfcValve y lanzará un error crítico si detecta que falta el código de clasificación AEAS o si el atributo de nivel de calidad de los datos de emisiones no está completado).





✔ **APROBADO:** Req_Bomba_Mantenimiento

Descripción: Todos los grupos motobomba deben contener la clasificación AEAS y el caudal nominal.
Entidades Aplicables: Encontrados 12 elementos tipo IfcPump.

Requisito	Estado	Detalle
Clasificación AEAS (IfcClassificationReference)	Cumple	Encontrada en 12/12 elementos.
Caudal Nominal (Pset_PumpTypeCommon)	Cumple	Encontrada en 12/12 elementos.

Todos los elementos de este tipo cumplen las reglas establecidas en el IDS.

✖ **FALLO:** Req_Deposito_GMAO

Descripción: Todos los depósitos deben tener la Vida Útil estimada y el parámetro de Huella de Carbono (GWP).
Entidades Aplicables: Encontrado 1 elemento tipo IfcTank.

Requisito	Estado	Detalle
Vida Útil (Pset_MaintainableEntity)	Cumple	Encontrada en 1/1 elementos. (Valor: 50 años).
Huella de Carbono (Pset_EnvironmentalImpactIndicators)	Falla	Fallo en 1/1 elementos.

Detalles del Error (Log para el modelador):

Elemento culpable: IfcTank - Nombre: "Depósito Maderuelo (Sin Servicio)"
GUID: 3X8A9B2C1D4E5F6G7H8I9J
Motivo del rechazo: El atributo GlobalWarmingPotential no existe en el conjunto de propiedades o no tiene asignado un valor numérico válido de masa (IfcMassMeasure).

Figura 20. Reporte del informe de validación IDS propuesto para comprobar los ficheros IFC. Elaboración propia

En el ***Anexo 2*** se facilita el código en XML con la estructura del archivo IDS.

- **Integridad de los identificadores globales (GUID)**

Dado que el *GlobalId* (GUID) actúa como clave primaria en las bases de datos relacionales del GMAO, cualquier regeneración accidental del GUID en el software nativo romperá la trazabilidad del activo.

El EIR no permite la sobreescritura de modelos que modifique los identificadores únicos.

Durante la auditoría de sintaxis, se debe comprobar que los elementos mantienen su GUID original a través de las diferentes versiones y ampliaciones del modelo, garantizando que el historial de mantenimiento y emisiones de GEI acumulado en el GMAO no se desvincule de su geometría física.

5.2.1.4. El Entorno Común de Datos (CDE - Common Data Environment)

El conjunto de normas ISO 19650 requiere que toda la producción, validación y distribución de información del AIM se realice a través de un Entorno Común de Datos (CDE). Para la gestión de infraestructuras hidráulicas, el CDE ya no es un simple repositorio de documentos en la nube, sino el único canal autorizado de intercambio de datos dentro del sistema GMAO.

En la solución metodológica propuesta, el CDE no es solo un repositorio de documentos basado en un servidor o en un alojamiento en red, sino también un flujo de información mediante la configuración de un árbol de directorios donde se ubicarán los ficheros según el estado en el que se encuentren (Trabajo en Progreso, Compartido, Publicado y Archivado) con el fin de cumplir con los requisitos de control de calidad del EIR.

5.2.1.4.1. Definición del CDE

En primer lugar se deberá de definir la ubicación donde va a estar establecido el CDE. Para el desarrollo de esta investigación se ha probado con dos ubicaciones.

- **En un servidor local o carpetas de red compartidas dentro de una red local.**

Esta configuración permite un acceso directo desde los equipos del organismo o del operador de la infraestructura pero dificulta la transmisión y colaboración de la información con otros agentes que forman parte de la explotación de la infraestructura, por lo que para desarrollar la metodología de la investigación es el entorno adecuado pero una vez se quiera poner en marcha, es necesario proporcionarle una plataforma on-line.

- **En una plataforma de almacenamiento on-line o servidor web.**

Esta configuración es la que más se alinea con el espíritu de la metodología BIM. Si bien nos recuerda los borradores publicados por el BSI en el 2026 en los que se aleja más de modelos tridimensionales para funcionar como una base de datos multidisciplinar, el alojamiento web debe de orientarse al establecimiento de una base de datos para que a través de API o aplicaciones web (como la que va a desarrollar esta investigación) permita visualizar con estos datos.

Este visualizador que ejerce de catalizador entre la base de datos multidisciplinar (donde también se almacenan, en menor medida, los elementos tridimensionales) permite establecer roles y responsabilidades sin necesidad de acceder a la plataforma de alojamiento de datos o CDE. Esto permite que se establezca una gobernanza en la gestión del dato y, por ende, de los activos que conformar el AIM.

5.2.1.4.2. Roles y responsabilidades

Se deberán de determinar los roles y responsabilidades de los interlocutores con el CDE, para ello se rellenará una tabla como la que se ofrece a continuación:

Tabla 8. Tabla a completar con roles y responsabilidades. Elaboración propia

Rol	**Responsabilidades**
Responsable BIM (Ingeniero gestor)	• Comunicación BIM con empresa externa. • Validación de los modelos IFC transformados a GeoJSON por parte del Coordinador BIM (Técnico Gestor) • Gestionar el flujo de información dentro del repositorio de la gestora de la red. • Gestionar e incorporar los planes de mantenimiento en el visor. • Gestionar e incorporar las emisiones GEI en el visor.
	•
	•

5.2.1.4.3. Estado de los modelos

Se establecen 4 estados para los modelos:

Tabla 9. Estado de los modelos. CDE. Elaboración propia

Estado	**Descripción**
Trabajo en progreso	Ficheros no aptos para ser compartidos
Compartido	Ficheros aptos para ser compartidos entre la empresa externa y la empresa gestora pero no para ser publicados en el visor
Publicado	Ficheros aptos para ser publicados en el visor al ser revisados por el Responsable BIM de la empresa gestora.
Archivado	Ficheros de activos que ya no se encuentran operativos en la red de distribución.

5.2.1.4.4. Estructura de carpetas

La estructura tendrá una carpeta raíz que se nombrará con la denominación de la red de abastecimiento a gestionar y de ella colgarán 5 subcarpetas:

- INFO: Para incluir información externa de la red o del propio contrato
- GIS: Donde se ubicaran los modelos de archivos procedentes o que intervienen en los programas GIS
- BIM: Se ubicarán los modelos y los ficheros de comprobación (ILS) para la validación de los modelos IFC
- GMAO: Lugar para el almacenamiento y ubicación de los ficheros con los manuales y guías de operación, conservación y mantenimiento de los activos y los ficheros javascript con la configuración del plan de mantenimiento y sus características.
- GEI: Espacio para incluir los ficheros con las declaraciones de emisiones (EPD) o documentos similares y almacenar Informes de declaración de emisiones generadas.

Dentro de cada una de las 5 subcarpetas se crearán carpetas que sigan la misma línea que los estados de los modelos. Esto permitirá una mayor facilidad a la hora de conocer que está por aprobar, que está aprobado y se puede publicar, lo que está publicado y lo que ya no se usa.

Se deberá detallar la estructura de carpetas con el siguiente formato de tabla:

Tabla 10. Tabla a rellenar con estructura de carpetas. CDE. Elaboración propia

Nivel 1	**Nivel 2**	**Nivel 3**
Municipio o red que gestionar	00 -INFO	

5.2.1.4.5. Nombrado de los ficheros

Para asegurar una correcta interpretación de los ficheros y no caer en errores por duplicidades u otros menesteres, se tiene que establecer un sistema de nombra de la documentación que vaya a pasar por el CDE.

Se detallarán los campos que componen el sistema de nombrado, dando una descripción, identificando el formato y el número de caracteres máximos.

5.2.1.4.6. Control de acceso a la información

Para establecer una estrategia de seguridad de la información conforme con la norma UNE-EN ISO 19650-5:2020, se debe establecer permisos para el acceso de la información e identificar los directorios a los que se puede acceder y lo que se puede realizar con dichos permisos.

Para identificar los permisos correctamente, se completarán dos tablas: en la primera se indican los permisos y los privilegios de los que dispone cada perfil; y en la segunda tabla se indicarán los permisos para todos los directorios del CDE.

Tabla 11. Permisos establecidos en el CDE

Permisos	**Descripción**
Administrador	Controles administrativos completos
Editor	Ver + descargar + publicar marcas de revisión + cargar + editar
Creador	Ver + descargar + publicar marcas de revisión + cargar
Ver	Ver + descargar

Tabla ejemplo:

Nivel	**Carpeta**	**Cargo**	**Permisos**
1	MADERUELO	Responsable BIM (Ingeniero gestor)	Administrador
		Todos los integrantes	Ver

2	01 - GIS	Responsable BIM (Ingeniero gestor)	Administrador
3	01 - TRABAJO EN CURSO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Creador

- **Automatización y actualización continua de datos (ETL)**

El cumplimiento de la estructura semántica anterior es el prerrequisito tecnológico que completa la Fase II del proyecto: la transición de un modelo pesado de construcción (BIM) a un formato web ligero, de código abierto y compatible con Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Dado que los GMAO tradicionales y los visores web geográficos (por ejemplo, Leaflet) no procesan de forma nativa la topología compleja de un archivo IFC, el flujo de trabajo metodológico plantea un proceso ETL (Extracción, Transformación y Carga). Este proceso extrae la información espacial y alfanumérica de interés y la convierte a formato GeoJSON, el estándar de facto para el trazado de vectores en cartografía web.

Sin embargo, la gestión de infraestructuras hidráulicas no es estática; las redes se amplían, los equipos se sustituyen y los parámetros (como la vida útil restante) varían con el tiempo. Por ello, el proceso de extracción no debe concebirse como una exportación destructiva de un solo uso, sino como una actualización continua.

Para facilitar la transformación de datos, se propone el uso de la librería IfcOpenShell mediante Python. Con el uso de la librería se ha desarrollado un algoritmo para importar un modelo IFC (ej. una nueva ampliación de red) y actualizar una base de datos espacial GeoJSON preexistente, utilizando el identificador único (GUID) para evitar duplicidades.

En el ***anexo 1*** se adjunta el código del Conversor IFC-GeoJSON.

5.3. Fase III: Incorporación y establecimiento de los planes de mantenimiento a los activos

Una vez definida la estrategia de implementación de la metodología BIM, con la configuración del CDE, se tienen que incorporar o definir los planes de mantenimientos necesarios a los activos inventariados.

5.3.1. Identificación de los elementos existentes en la red

Una vez inventariada la red, el siguiente paso será identificar los distintos tipos de elementos que componen la red y sus características para determinar el plan de mantenimiento que deben de seguir.

Las tipologías de los elementos que deben tener un plan de mantenimiento son los siguientes:

- **Bombeo**

El plan de mantenimiento tendrá que revisar tanto las bombas de impulsión como la construcción (si existiese) donde se ubique o ubiquen las mismas. A su vez, deberán revisarse los elementos de protección e instalaciones auxiliares del edificio (extintores, iluminación, ventilación…)

- **Depósito para el almacenamiento de agua:**

El plan de mantenimiento tendrá que abarcar tanto la propia estructura como los elementos asociados a la misma (elementos de cierre, valvulería, condiciones e instalaciones)

- **Tuberías:**

En este caso, el plan de mantenimiento se centrará el la localización y detección de fugas ya sea mediante inspección visual como el empleo de equipos para la detección de fugas.

- **Válvulas:**

Dependiendo del tipo de elemento dentro de las válvulas se realizarán una serie de operaciones específicas (comprobar el funcionamiento de la ventosa, comprobación del purgador de la ventosa,

apertura y cierre correcto de la válvula de seccionamiento…) y unas operaciones comunes entre todas las válvulas (revisión del registro, estado visual, limpieza, estado de oxidación…)

5.3.2. Definición del plan de mantenimiento por tipo de elemento

Una vez identificados los tipos de elementos, se procede a confeccionar los planes de mantenimiento.

Los planes de mantenimiento se dividen en tres tipos según su periodicidad: periódica, detallada y extraordinaria. Las tareas que realizar dentro de cada tipo de plan varían, dedicando más tiempo y recursos a las detalladas y extraordinarias que a las periódicas.

Dado que el ámbito de estudio de esta investigación parte de los depósitos de almacenamiento de agua potable e incluye tuberías y valvulería, queda excluido los planes de mantenimiento de los equipos de bombeo.

5.3.3. Generación del fichero para la incorporación de los planes de mantenimiento en la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI

Una vez establecidos los planes de mantenimiento, se generará un fichero en formato *javascript* (.js) para que lo pueda interpretar la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI y a posteriori se pueda modificar dentro de la propia aplicación, sin tener que volver a generar el fichero en formato *javascript*.

La estructura del fichero contendrá los campos recogidos en las fichas de los planes de mantenimiento confeccionados: Elemento, Tipo de Elemento, Plan de Mantenimiento, Frecuencia, Tareas y Recursos Empleados (Desplazamiento, Mano de Obra, Medios Auxiliares).

```
const PLANES_MANTENIMIENTO_RED = {
  "_default_Valvula": [
    { id: "PM-01", desc: "Inspección visual de fugas y corrosión", freq: "Semestral", co2: 6.5 },
    { id: "PM-02", desc: "Engrase de husillo y prueba de maniobra", freq: "Anual", co2: 8.0 }
  ],
  "_default_Bomba": [
    { id: "PB-01", desc: "Inspección de temperatura y vibraciones", freq: "Mensual", co2: 5.0 },
    { id: "PB-02", desc: "Revisión de cojinetes y cierre mecánico", freq: "Semestral", co2: 7.0 }
  ],
  "_default_Deposito": [
    { id: "PD-01", desc: "Revisión de impermeabilización y cubierta", freq: "Semestral", co2: 8.5 },
```

Figura 21. Ejemplo del esquema del fichero para establecer los planes de mantenimiento. Elaboración propia

5.4. Fase IV: Inventario y cálculo de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

5.4.1. Definición de los límites organizacionales y operacionales

Siguiendo las directrices de la norma UNE-EN ISO 14064-1:2019 (punto 5), hay que establecer limites al inventario ya que esto acota el alcance tanto de las operaciones como de los elementos que forman parte de la actividad a inventariar.

5.4.1.1. **Límite organizacional**

Dado que esta investigación se centra en la parte de mantenimiento y explotación de una red de distribución de agua, se pueden dar dos enfoques según el punto 5.1. Límites de la organización:

- Control: este será el caso de si esta metodología se emplea para una entidad gestora y responsable del 100% de las operaciones de mantenimiento y control de activos.

- Participación en el capital: este será el caso de si esta metodología se emplea en una empresa de mantenimiento la cual depende de la entidad gestora y a la que tiene que rendir cuentas de las emisiones de las actividades que ha realizado.

Se tendrá que establecer el enfoque antes de iniciar la elaboración del informe.

5.4.1.2. **Límite operacional**

Dado que la actividad objeto de la investigación es el mantenimiento y explotación de una red de distribución de agua, la actividad está acotada dentro del ciclo integral del agua de la siguiente manera:

- Captación de agua desde un bombeo.

- Impulsión del agua al Depósito a través de una tubería de transporte

- Almacenamiento de agua en Depósito destinado para agua de consumo.

- Distribución del agua a través de una red de válvulas y elementos de control (válvulas).

5.4.2. Inventario de emisiones

- **Categoría de emisiones**

La norma ISO 14064-1:2019 establece una clasificación por categorías de emisiones (Categoría 1 a 6) en función el tipo de emisión, siguiendo los alcances establecidos por el CHG Protocol (Alcance 1 a 3). En el informe a obtener se clasificarán las actividades relacionadas con el mantenimiento de la red de distribución en cada una de las categorías indicadas por la Norma. A modo de resumen, se facilita una tabla para su clasificación dependiendo del empleo de la metodología para una entidad gestora que se ocupa de la totalidad de la infraestructura (Control) o para una empresa que se ocupa del mantenimiento de la infraestructura (Participación en el capital):

Tabla 12. Descripción de la categoría y el enfoque según el responsable. Elaboración propia

Categoría ISO 14064-1:2018	**Descripción**	**Enfoque de control (Entidad o empresa gestora de la infraestructura)**	**Enfoque de participación en el capital (Empresa encargada del mantenimiento)**
Categoría 1: Emisiones y remociones directas de GEI	Emisiones procedentes de fuentes que son propiedad de la entidad o están bajo su control	• Combustión en grupos electrógenos • Combustión móvil de la flota técnica	• Combustión en grupos electrógenos • Combustión móvil de la flota técnica • Maquinaria de obra
Categoría 2: Emisiones indirectas por energía importada	Emisiones asociadas a la generación de la energía eléctrica consumida en las instalaciones del servicio	• Consumo eléctrico de las bombas de impulsión	-
Categoría 3: Emisiones indirectas por transporte	Emisiones derivadas del transporte de material o personal	• Movilidad laboral de la plantilla (casa-centro de trabajo)	• Movilidad laboral de la plantilla (casa-centro de trabajo) • Transporte de material fuera de una actuación correctiva

Categoría 4: Emisiones por productos y servicios utilizados	Emisiones de los bienes que conforman la infraestructura	• Elementos instalados en la red de distribución durante el alcance temporal del informe	• Elementos en almacén para reparaciones
Categoría 5: Emisiones indirectas asociadas al uso de productos	Emisiones y créditos derivados del tratamiento y fin de vida de canalizaciones y equipos obsoletos retirados de la red	-	• Gestión de residuos de los elementos retirados o de las tierras extraídas.
Categoría 6: Otras emisiones indirectas	Cualquier otra fuente indirecta que no pueda ser clasificada en las categorías 3 a 5 (no identificada como material en este ejercicio).	• Otros	• Otros

- **Metodología de cálculo de las emisiones**

Conforme al apartado 6.2 Selección del enfoque de cuantificación y al Anexo F de la ISO 14064-1:2019, la organización debe cuantificar y reportar individualmente los siete gases de efecto invernadero reconocidos por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC):

- Dióxido de Carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxido Nitroso (N_2O)
- Hidrofluorocarburos (HFCs)
- Perfluorocarburos (PFCs)
- Hexafluoruro de Azufre (SF_6)

- Trifluoruro de Nitrógeno (NF_3)

- **Potenciales de Calentamiento Global (GWP)**

Para homogeneizar los diferentes vectores de emisión a toneladas de CO_2 equivalente (tCO_2-eq), se adoptan los Potenciales de Calentamiento Global con un horizonte temporal de 100 años (GWP_{100}) publicados en el 5º Informe de Evaluación del IPCC (AR5 - 2014), tal y como dictamina el estándar internacional:

Tabla 13. Potenciales de calentamiento global según el IPCC AR5. Elaboración propia

Gas de Efecto Invernadero	**GWP_{100} (tCO_2-eq)**
Dióxido de Carbono (CO_2)	1
Metano (CH_4)	28
Óxido Nitroso (N_2O)	265
Perfluorocarburos (PFCs)	2088* *(Mezcla de 50% HFC-32 50% y 50% HFC-125)*
Hexafluoruro de Azufre (SF_6)	23500

5.4.2.1. Inventario de equipos móviles y maquinaria en las tareas de los planes de mantenimiento.

Definidas las tareas de los planes de mantenimiento por elemento y los recursos empleados para cada una de las actividades, se pueden determinar las fórmulas a emplear en el cálculo de las emisiones por cada actividad.

Antes de comenzar con el cálculo es necesario inventariar, clasificar y determinar las emisiones de cada uno de los equipos móviles y maquinaria empleados en las distintas actividades del plan de mantenimiento.

Una vez analizadas todas las actividades, se ofrece a continuación el inventario de los consumos de combustibles asociados a cada uno de los elementos necesarios para desarrollar las actividades recogidas en los PM.

5.4.2.2. Obtención de las emisiones de los combustibles empleados en la maquinaria empleada

Una vez identificados los combustibles empleados para las distintas actividades de los planes de mantenimiento, hay que determinar la tipología de los gases de los combustibles empleados.

Identificados los gases emitidos por cada combustible, se procede al cálculo de cada uno de ellos. En primer lugar, se obtiene las emisiones de los GEI a través del producto entre el poder calorífico del combustible y el factor de emisión de cada uno de los GEI. Para determinar dichos parámetros se recurre al Anexo V del Informe de Inventarios GEI 1990-2024 (Edición 2026) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

5.4.2.3. Obtención de los indicadores de impacto ambiental y uso de recursos por materias primas y materiales empleados en las actividades del plan de mantenimiento.

Siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 15804+A1, se procede a buscar y definir los indicadores de impacto ambiental y usos de recursos.

- **Unidades declaradas o funcionales**

En primer lugar, se definen las unidades declaradas o funcionales de las materias primas y los materiales empleados:

Tabla 14. Unidades declaradas o funcionales. Elaboración propia

Materia prima / Material	**Unidad declarada**	**Equivalencia**
Hormigón en masa HM-220	1 m^3	≈ 2300 kg
Agua potabilizada	1 m^3	1000 kg
Acero inoxidable AISI 304	1 kg	1 kg
Hipoclorito sódico 15%	1 kg	0,82 l
Pintura impermeabilizante epoxi/acrílica	1 kg	1 kg

Lámina EPDM 1,2 mm	1 m²	1,5 kg
Tubería de fundición dúctil DN100 C40/C50	1 m	15,5 kg
Válvula de seccionamiento FD DN 100 PN16	1 ud	19 kg
Ventosa trifuncional FD DN50/60 PN16	1 ud	12,5 kg

- **Origen de indicadores y coeficientes**

Una vez definidas las unidades declaradas de los materiales se debe de proceder a la búsqueda de los módulos y coeficientes que componen los indicadores de impacto ambiental.

Hay que tratar de primar las declaraciones de emisiones del producto (EDP) que estén certificadas a través de la EN 16757:2023, que tengan una fecha de primera emisión próxima al tiempo en el que se realiza la consulta, ya que da más confianza al tenerse en cuenta nuevas tecnologías o procedimientos a la hora de auditar y certificar las emisiones de un producto. De igual forma, la ubicación donde se realiza la certificación será más beneficiosa cuando se encuentre próximo al punto donde se esté inventariando los GEI, ya que en otros países pueden tener otras técnicas de medición o de producción de los materiales que alteren la realidad del punto estudiado. Por último, el desarrollo de todos los módulos del ACV es importante (en las certificaciones con EPD, la mayoría tienen todos los módulos desarrollados y certificados).

Si no se dispone de la EDP del producto, hay que buscar en bases de datos o publicaciones para obtener los datos. Lamentablemente muchas de las bases de datos para obtener los coeficientes de emisiones son de pago y de la información que se facilita, no todos los módulos están completados, por lo que es difícil calibrar si el dato facilitado es correcto.

Durante esta investigación se han empleado diversas vías: consulta a través de la inteligencia artificial (Gemini), bases de datos de pago (BEDEC – ItеC, Ecoinvent v 3.8, la base de datos del IPCC (EFDB – IPCC) y los indicadores de impacto ambiental contenidos en el Generador de Precios 2026 del sofware CYPE (de pago).

Una de las fuentes de datos que se recomienda emplear es EDP-Hub, en la cual vienen certificaciones EDP de numerosos países de la Unión Europea (y de otros países extracomunitarios)

en los que permiten visualizar y descargar las certificaciones, pero no vincular desde una API los indicadores de dichas certificaciones.

5.4.3. Evaluación y gestión de la incertidumbre

Una vez obtenidos los indicadores y coeficientes de emisiones, es necesario evaluar la incertidumbre asociada de los datos tomados y realizar una evaluación que determine la incertidumbre a nivel de la categoría del inventario de GEI.

Dado que este es un proyecto de investigación, se asumirá en la metodología la realización de una evaluación cualitativa.

La evaluación cualitativa se realizará en función de los esquemas de evaluación de la calidad de los datos genéricos y específicos del Anexo E de la UNE EN-15804:2012+A2:2020. Esta clasificación establece un nivel de calidad (de muy bueno a muy pobre) evaluando tres aspectos (o representatividades): geográfica, técnica y temporal.

La tabla de equivalencias que se establece para esta investigación es la siguiente:

Tabla 15. Equivalencia entre la evaluación y gestión de la incertidumbre. Elaboración propia

Nivel de calidad (Según Anexo E UNE EN-15804:2012+A2:2020	**Evaluación cualitativa para Inventario GEI**	**Puntuación para evaluación cualitativa**
Muy bueno	A	5
Bueno	B	4
Medio	C	3
Pobre	D	2
Muy pobre	E	1

Para determinar el nivel de incertidumbre de distintos orígenes de datos de emisiones, se aplicará el truncamiento a la media aritmética entre las puntuaciones recogidas en la tabla y se asignará la evaluación cualitativa correspondiente.

5.4.4. Estructura y organización del informe del inventario de GEI

Por último, la elaboración del informe del inventario de GEI se realizará acorde a la plantilla incluida en el Anexo F de la norma UNE-EN ISO 14064-1:2019.

El informe dispondrá de la siguiente información:

- DATOS GENERALES
    - Empresa que informa:
    - Entidad responsable del informe:
    - Periodo del informe registrado:
    - Límites de la organización: Apartado 5.4.1.
    - Límites del informe: Apartado 5.4.1.
- DATOS DE EMISIONES
    - Categorías y subcategorías:
        - Categoría 1. Emisiones y remociones directas de GEI en kg CO2-eq
        - Categoría 2: Emisiones indirectas de GEI causadas por energía importada
        - Categoría 3: Emisiones indirectas de GEI causadas por la transportación
        - Categoría 4: Emisiones indirectas de GEI causadas por productor que utiliza la organización.
        - Categoría 5: Emisiones indirectas GEI asociadas con el uso de los productos de la organización.
        - Categoría &: Emisiones indirectas de GEI de otras fuentes
    - Emisiones y datos que indicar en cada categoría:
        - TOTAL (GWP)
        - Dióxido de carbono CO_2
        - Metano CH_4
        - Óxido nitroso N_2O

- Hidrofluorocarbonos HFCs
- Kilos de perfluorocarbonos PFCs
- Hexafluoruro de azufre SF_6
- Trifluoruro de nitrógeno NF_3
- Incertidumbre cualitativa: Apartado 5.4.7

5.5. Fase V: Desarrollo y despliegue de la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI

5.5.1. Desarrollo de la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI

Para aunar toda la información se decide desarrollar una aplicación web que trate de juntar todas las disciplinas que abarca la metodología. Se decide que la base visual donde se va a observar la información sea un sistema de información geográfica (GIS) dadas sus grandes bondades a la hora de búsqueda de elementos (con buscadores) y ubicación con imágenes sin limitaciones de espacio.

Para desarrollar el SIG se decide emplear la API de Leaflet, la cual es de código abierto y ha sido empleada multitud de veces para facilitar un visor SIG en diversas organizaciones (, organismos oficiales (Dirección General de Tráfico) y ámbito educativo. Es sencillo de programar y ese es uno de los motivos a la hora de emplear esta API, ya que el desarrollo del código lo hará una inteligencia artificial generativa, en este caso, Gemini, de la empresa Google.

La estratégica de solicitud de código será la siguiente:

- Primero establecer el esquema de datos y la lectura de los ficheros GeoJSON que será la base.

- A continuación, dotar al visor de botones y ayudas a la visualización y búsqueda (barra de búsqueda, leyenda, selector de capas…)

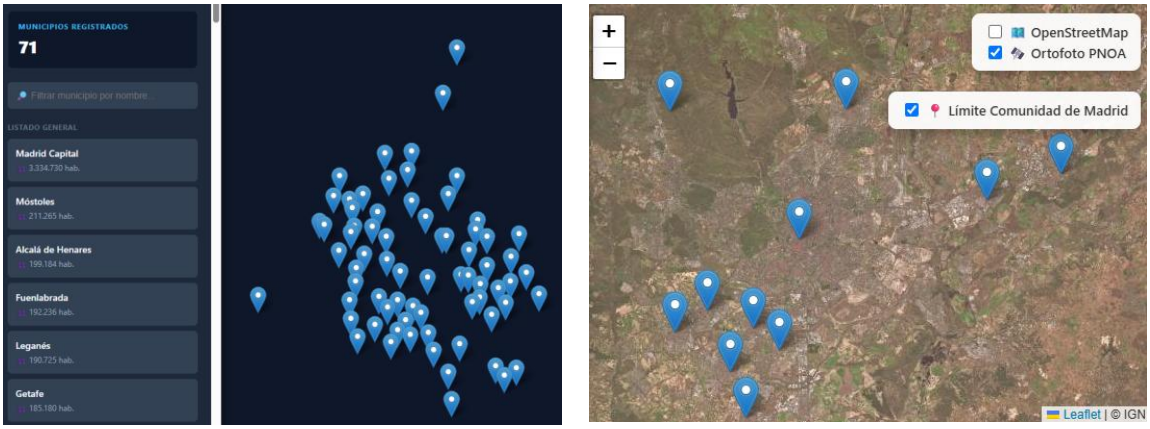


Figura 22. Primeras iteraciones con Leaflet y Gemini. Elaboración propia

- Después se empezaron a incluir visor de coordenadas, selector de coordenadas, buscador inteligente…

Una vez establecida la base del visor SIG, se le pide a Gemini que añada complementos sencillos, como son banners laterales para introducir información.

A partir de aquí comienza el desarrollo del GMAO, en el cual se solicita que se vean los planes de mantenimiento activos de los elementos y se le añade una columna de emisiones CO2.

Los planes de mantenimiento y las emisiones de CO2 se establecen en un fichero javascript, el cual es muy sencillo editar incluso desde el propio navegador (pero no vale de mucho ya que la información que se modifica en el navegador se borra, ya que está en la memoria caché). Para poder sobrescribir la información es necesario descargarse el fichero.

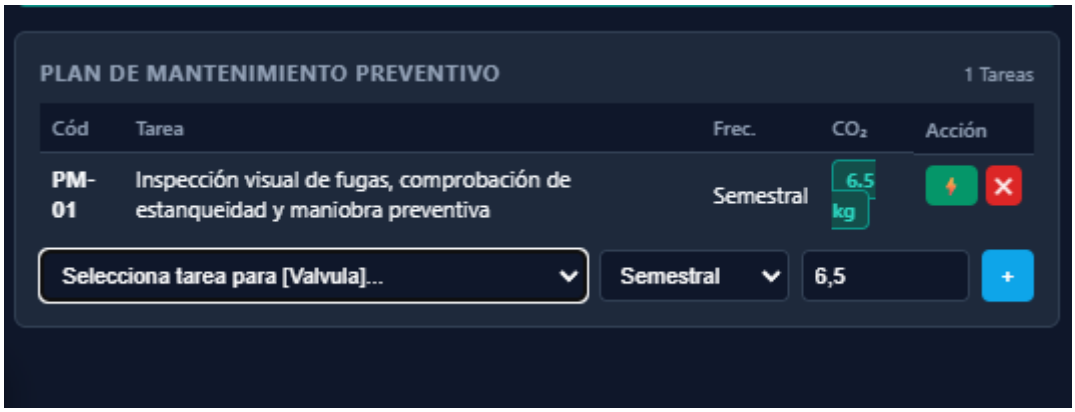


Figura 23. Banner con funciones para agregar o quitar operaciones del plan de mantenimiento definido en el fichero javascript. Elaboración propia

Una vez establecido el plan de mantenimiento se le pide que vaya un poco más allá y que trate de añadir un fichero IFC con un visualizador. Ese es el primer escoyo que nos encontramos y el motivo de que se tengan que usar scripts auxiliares en código pyhton para poder extraer o modificar información del fichero IFC. Aun así, Gemini genera un objeto virtual, embebido en la propia web.

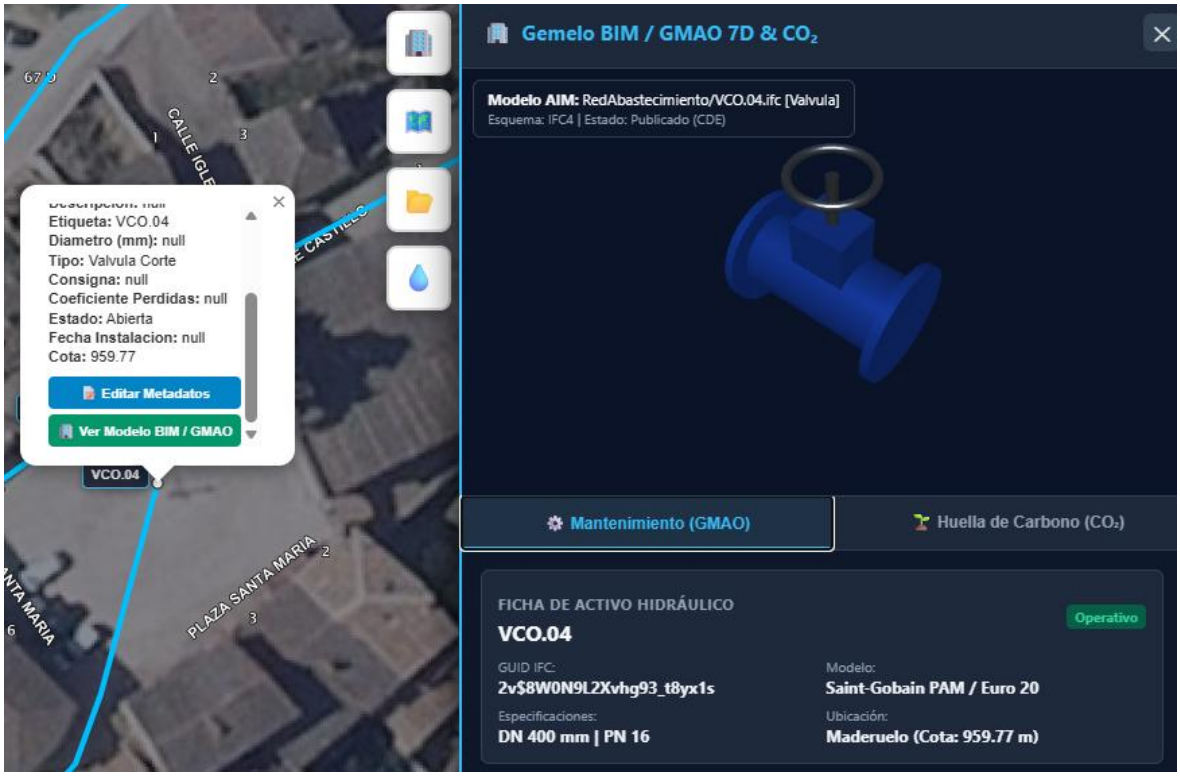


Figura 24. Intento de interpretación de archivo IFC, cuando en realidad es un código embebido por la propia web. Elaboración propia

Finalmente, se desarrolla la pestaña de huella de carbono y en ella se pueden observar contadores con estimaciones que ha hecho la propia IA.



Figura 25. Banner con pestaña de huella de carbono configurado por Gemini. Elaboración propia.

Dado a la imposibilidad de poder añadir ficheros IFC directamente y tomar los datos el visor se queda como GMAO-GEI.

A continuación se facilita el enlace para que cualquiera (durante el tiempo que esté disponible el servidor) pueda acceder al visor.

https://maderuelo.pedroisidro50.workers.dev/

5.5.2. Informe generado por Inteligencia Artificial (Gemini)

Dado que el programador de la aplicación web ha sido Gemini, se le solicita elaborar un informe que exponga como ha desarrollado la aplicación.

A partir de aquí, la información ha sido elaborada con Inteligencia Artificial

---

Memoria de Ingeniería Web y Gestión de Ciclo de Vida del Software para el Gemelo Digital Hidráulico GIS-OpenBIM, GMAO y Descarbonización

1. Fase de Análisis del Proyecto

1.1. Marco Contextual

El proyecto se circunscribe al término municipal de Maderuelo (Segovia), cuya red de abastecimiento y distribución de agua potable presenta particularidades topográficas, trazados históricos y componentes electromecánicos críticos (depósito general de cabecera, ramales de fundición dúctil, polietileno y valvulería de regulación). La gestión tradicional municipal presentaba dispersión documental, ausencia de registros georreferenciados dinámicos y desconexión entre los proyectos constructivos BIM y las labores diarias de explotación y mantenimiento.

1.2. Visión y Alcance

Visión: *Consolidar una plataforma web única, ligera, abierta y accesible desde navegador para técnicos municipales y operarios de campo, integrando en una única pantalla la supervisión geoespacial (GIS), la información constructiva estandarizada (OpenBIM), la programación del mantenimiento preventivo (GMAO) y la contabilidad de huella de carbono (GEI).*

Alcance: *Abarca desde la ingesta, validación sintáctica (IDS) y conversión de modelos IFC hasta la representación en mapa interactivo (Leaflet), gestión de órdenes preventivas según normas UNE-*

ISO 55000 y cálculo de emisiones conforme a la norma ISO 14064-1 con exportación automatizada de reportes en PDF.

1.3. Selección de Objetivos

- ***Objetivo General:*** *Desarrollar e implantar una Single-Page Application (SPA) para la gestión técnica integral de la red de agua de Maderuelo.*

- ***Objetivos Específicos:***

  - *Desplegar un visor cartográfico interactivo de alto rendimiento para capas vectoriales de tuberías, valvulería y depósitos.*

  - *Garantizar la interoperabilidad OpenBIM mediante esquemas IFC validados formalmente con reglas IDS (Information Delivery Specification) y Python ifctester.*

  - *Implantar fichas técnicas dinámicas de activos vinculadas a planes de mantenimiento preventivo periódicos (GMAO).*

  - *Calcular automáticamente las emisiones de CO2e (Alcances 1, 2 y 3) según factores oficiales del MITECO y generar memorias ejecutivas descargables.*

1.4. Selección de Usuarios

- ***Operario de Campo / Brigada de Mantenimiento:*** *Perfil móvil enfocado en la consulta ágil de fichas técnicas, localización de válvulas sobre el terreno e inspección visual de tareas preventivas.*

- ***Ingeniero Hidráulico / Responsable Técnico Municipal:*** *Perfil supervisor enfocado en el análisis de presiones, estado de la infraestructura, auditoría de datos BIM y planificación de renovaciones de red.*

- ***Auditor Ambiental / Responsable de Sostenibilidad:*** *Perfil enfocado en la monitorización de consumos energéticos, emisiones asociadas al bombeo y extracción de informes oficiales ISO 14064-1.*

1.5. Expectativa de la Organización

El Ayuntamiento y la entidad gestora persiguen reducir las pérdidas por fugas no detectadas, prolongar la vida útil de los activos hidráulicos mediante mantenimiento predictivo/preventivo, centralizar los datos en formatos abiertos (evitando el secuestro tecnológico por licencias de software privativo) y disponer de métricas claras de descarbonización para cumplir con las exigencias del PERTE de digitalización del ciclo del agua.

1.6. Expectativa del Usuario

Los operarios y técnicos requieren una interfaz rápida, intuitiva, que funcione sin demoras ni retardos de carga, compatible con tablets en campo, con un buscador instantáneo que permita introducir un código (Tag) y situarse inmediatamente sobre la arqueta o válvula correspondiente con toda su información técnica visible en un clic.

1.7. Identificar Casos de Uso (CU)

- ***CU-01:** Exploración y navegación cartográfica multicapa (callejero, ortofoto satelital, red de tuberías, valvulería y nodos singulares).*
- ***CU-02:** Búsqueda y geolocalización rápida de activos mediante Tag o tipología con animación Fly-to.*
- ***CU-03:** Consulta de ficha técnica OpenBIM / GMAO (Psets, dimensiones, cotas, fabricante y plan de mantenimiento).*
- ***CU-04:** Filtrado e inspección de estado de maniobra de válvulas (Abierta, Cerrada, Modulada).*
- ***CU-05:** Simulación y cálculo analítico de emisiones de gases de efecto invernadero (Alcances 1, 2 y 3).*
- ***CU-06:** Generación y descarga directa en el navegador de informes técnicos de mantenimiento y sostenibilidad en formato PDF.*

1.8. Diagramas de Clases de Dominio

El dominio conceptual del sistema articula las siguientes clases nucleares:

- ***ActivoHidraulico (Clase Abstracta):** tag: String, geometry: GeoJSON, fechaInstalacion: Date, estadoOperativo: Enum, criticity: Integer.*
- ***Tuberia (Hereda de ActivoHidraulico):** dn: Integer, material: String, longitud: Float, rugosidad: Float, velocidadDiseno: Float.*
- ***Valvula (Hereda de ActivoHidraulico):** tipoValvula: String, consignaPresion: Float, posicion: Enum(Abierta, Cerrada, Modulada).*
- ***Deposito (Hereda de ActivoHidraulico):** capacidadUtil: Float, cotaCoronacion: Float, cotaSolera: Float, psetDatosDeposito: Object.*

- ***PlanMantenimiento:*** *idPlan: String, periodicidad: Enum(Semanal, Mensual, Semestral, Anual), protocoloTareas: Array, ultimoMantenimiento: Date.*

- ***RegistroEmisionGEI:*** *alcance: Integer, fuenteEmision: String, datoActividad: Float, factorEmision: Float, emisionesCO2e: Float.*

1.9. Prototipo Rápido

Se desarrolló una prueba de concepto preliminar basada en un archivo único HTML integrando Leaflet CDN y un archivo GeoJSON de 15 elementos lineales para comprobar la tasa de refresco cartográfico en navegadores móviles y verificar la visibilidad de los popups en campo.

1.10. Identificar Requerimientos del Sistema (SRS)

- ***Requerimientos Funcionales (RF):***

  - ***RF-01:*** *La aplicación debe renderizar el 100% de los tramos de tubería con diferenciación de color por material y grosor proporcional al DN.*

  - ***RF-02:*** *El buscador debe filtrar resultados en tiempo real con latencia inferior a 100 ms tras pulsar 2 caracteres.*

  - ***RF-03:*** *El sistema debe calcular la huella de carbono aplicando los factores oficiales del MITECO vigentes y categorizados por Alcance 1, 2 y 3.*

  - ***RF-04:*** *La exportación a PDF debe completarse en memoria local sin enviar datos a servidores externos.*

- ***Requerimientos No Funcionales (RNF):***

  - ***RNF-01 (Rendimiento):*** *Carga inicial de la aplicación inferior a 1,5 segundos en conexiones 4G estándar.*

  - ***RNF-02 (Compatibilidad):*** *Soporte completo para Chromium (Chrome, Edge), Gecko (Firefox) y WebKit (Safari).*

  - ***RNF-03 (Seguridad):*** *Modelo de ejecución desacoplado *client-side* sin almacenamiento de credenciales ni base de datos expuesta públicamente.*

2. Fase de Planificación

2.1. Selección de Software

- ***Entorno de Desarrollo:*** *Visual Studio Code, Python 3.11+ con librerías ifcopenshell, ifctester y openpyxl para preparación y auditoría de datos.*

- ***Librerías Web:*** *Leaflet.js v1.9.4 (cartografía), FontAwesome v6 (iconografía vectorial), jsPDF v2.5.1 y AutoTable (reportes documentales).*

- ***Formato de Intercambio:*** *GeoJSON estandarizado (RFC 7946), esquema IDS (XML de buildingSMART) e IFC 4.3 / 2x3.*

2.2. Selección de Hardware

- ***Equipo de Desarrollo:*** *Estación de trabajo estándar (Intel Core i7 / AMD Ryzen 7, 16 GB RAM, disco NVMe).*

- ***Dispositivos de Explotación Final:*** *Tablets rugerizadas para trabajo de campo (4 GB RAM, pantalla táctil de 10 pulgadas con alto brillo) y PCs de sobremesa para oficina técnica municipal.*

2.3. Selección del Equipo de Trabajo Adecuado

Para un desarrollo manual tradicional se requeriría un equipo multidisciplinar compuesto por: 1 Arquitecto de Software / Desarrollador Frontend Senior, 1 Especialista GIS / Ingeniero Hidráulico y 1 Gestor de Información BIM (BIM Manager / Coordinador IDS). Con el empleo de IA (Gemini), los roles se concentraron en un único investigador/ingeniero director del proyecto que supervisó y validó la generación del código.

2.4. Selección del Hosting Web

Dado que la plataforma se concibe como una Single-Page Application cliente sin lógica de servidor pesada, se seleccionó una infraestructura de alojamiento estático serverless de alta disponibilidad sobre CDN (GitHub Pages / Cloudflare Pages / AWS S3 + CloudFront), ofreciendo latencias mínimas globales, coste operacional nulo y soporte HTTPS nativo.

2.5. Benchmarking

Solución Analizada	*Fortalezas*	*Debilidades*	*Diferencial "Visor Maderuelo"*
GIS Corporativo (ArcGIS / QGIS Server)	*Potencia analítica geoespacial.*	*Costosas licencias, servidores dedicados pesados, nula integración nativa con GMAO/IDS.*	*Ligero, 100% web, coste cero de licencias, específico para redes de agua.*
Software GMAO Estándar (IBM Maximo, etc.)	*Gran potencia en gestión de órdenes de trabajo.*	*Visores cartográficos deficientes, sin enlace IFC/BIM, sin cálculo de huella de carbono.*	*Fichas GMAO geolocalizadas integradas en el popup del mapa con cálculo GEI.*
Visores BIM en la Nube (Autodesk Docs)	*Excelente visualización 3D.*	*Poco aptos para infraestructuras lineales de gran extensión territorial y dependientes de suscripción.*	*Conversión de IFC a GeoJSON para visualización territorial fluida.*

2.6. Estructura de Navegación

*Se adopta una **estructura de navegación radial o de cuadro de mando central (Dashboard Radial)**: el mapa geográfico constituye el núcleo perenne sobre el cual orbitan paneles emergentes e independientes (Panel de Búsqueda, Ficha Técnica BIM, Panel GMAO y Módulo de Huella de Carbono), permitiendo al usuario volver al contexto cartográfico sin recargas de página.*

2.7. Costos de Inversión

Concepto de Inversión	*Coste Tradicional (Programador Senior)*	*Coste con Asistencia IA (Gemini)*
Desarrollo de Software (140 horas de ingeniería)	*7.000 € - 9.800 € (50-70 €/h)*	*~200 € (Horas de supervisión e ingeniería de prompts)*
Licencias de Software y Servidores de Mapas	*3.500 € / año*	*0 € (Librerías Open Source y Hosting Estático CDN)*
Auditoría y Validación IDS	*1.800 €*	*0 € (Scripts Python OpenBIM integrados)*
TOTAL INVERSIÓN INICIAL	***12.300 € - 15.100 €***	***~200 €***

2.8. Beneficios a Obtener

- *Reducción del 45% en los tiempos de respuesta ante roturas o maniobras urgentes de valvulería en campo.*
- *Eliminación total de costes recurrentes en licencias privativas de software GIS o visores propietarios.*
- *Cumplimiento estricto de las exigencias normativas europeas y nacionales en descarbonización (ISO 14064-1) y digitalización de activos (ISO 19650).*
- *Aumento de la vida útil de los equipos electromecánicos en depósitos gracias a la rigurosidad del mantenimiento preventivo preventivo.*

3. Fase de Diseño Preliminar

3.1. Descripción de Casos de Uso Expandidos

- ***Caso de Uso CU-02: Búsqueda y Enfoque de Activo:***

- *Actor: Operario de campo.*
- *Precondición: La capa vectorial está cargada en el visor.*
- *Flujo Principal: El operario escribe "VALV.02" en el buscador. El sistema filtra la colección GeoJSON, calcula las coordenadas centrales del activo, desplaza suavemente la cámara del mapa (map.flyTo([lat, lng], 19)) y dispara el evento de apertura del popup de la válvula.*

- ***Caso de Uso CU-05: Cálculo de Huella de Carbono:***
- *Actor: Auditor ambiental.*
- *Flujo Principal: El usuario introduce los kWh consumidos en el bombeo y los litros de combustible consumidos por las furgonetas de mantenimiento. El motor aplica la fórmula $E = DA \times FE$, desglosa las toneladas de CO2e por alcance y actualiza el gráfico resumen en tiempo real.*

3.2. Análisis de Robustez

Se estructuró el análisis mediante el patrón de análisis de robustez (Boundary - Control - Entity):

- ***Objetos de Frontera (Boundary):** SearchBarView, MapView, BimPopupView, CarbonModalView.*
- ***Objetos de Control (Control):** MapController, AssetSearchController, EmissionCalculator, PdfExportController.*
- ***Objetos de Entidad (Entity):** GeoJsonStore, PsetDictionary, MaintenanceRegistry, EmissionFactorDatabase.*

3.3. Diagramas de Clases Preliminares

Define la relación estructural entre la entidad geoespacial de Leaflet (L.Layer), el almacén de datos (FeatureCollection) y el diccionario de mantenimiento y atributos OpenBIM (AssetPropertySet).

4. Fase de Diseño

4.1. Identificar Mensajes y Métodos de Casos de Uso

- *MapController.initMap(containerId, initialBounds)*
- *GeoJsonLoader.loadLayer(url, styleFunction, filterFunction)*

- *AssetSearchController.queryTag(searchString) -> FeatureRef*
- *MaintenanceManager.getTasksByAssetType(assetType) -> Array<Task>*
- *CarbonEngine.computeEmissions(electricityKwh, fuelLiters) -> EmissionBreakdown*
- *PdfExporter.generateReport(assetData, emissionsSummary) -> Blob*

4.2. Diagramas de Secuencia

Secuencia de Consulta y Exportación de Informe:

1. *El usuario pulsa "Generar Informe Técnico".*
2. *La interfaz (Boundary) invoca al CarbonEngine.computeEmissions().*
3. *El controlador recopila las propiedades del inventario desde GeoJsonStore.*
4. *Se transfieren los datos al módulo PdfExporter.*
5. *jsPDF compila las páginas vectoriales y las tablas con AutoTable.*
6. *Se emite el método doc.save('Informe_Maderuelo.pdf') que fuerza la descarga local en el navegador.*

4.3. Refinar Clases

Se introducen patrones de diseño orientados a eventos para evitar acoplamiento: el MapController actúa como un emisor de eventos (Event Emitter) que notifica la selección de un elemento mediante eventos personalizados (asset:selected), suscribiendo a este evento los componentes de la interfaz de usuario.

4.4. Diagramas de Colaboración

Modelan la interacción concurrente entre el hilo principal del DOM, el motor de teselas de Leaflet y los cálculos analíticos matemáticos en JavaScript.

4.5. Diagramas de Estados

El ciclo de vida del estado de una válvula o activo mecánico se formaliza en cuatro estados con transiciones restringidas:

[En Operación: Abierta] <---> [En Maniobra] <---> [En Operación: Cerrada] ---> [En Mantenimiento Preventivo] ---> [Fuera de Servicio / Avería]

4.6. Verificar Requisitos

Matriz de trazabilidad que garantiza que cada requerimiento funcional (RF-01 a RF-04) esté cubierto por al menos un método de control y una vista de usuario verificada.

5. Fase de Diseño Gráfico

5.1. Selección de Tipografías Web

- ***Tipografía de Interfaz Primaria:*** *'Inter', -apple-system, BlinkMacSystemFont, 'Segoe UI', Roboto, sans-serif. Aporta claridad geométrica y óptima legibilidad en pantallas técnicas y condiciones de deslumbramiento solar.*

- ***Tipografía de Datos Técnicos y Tags:*** *'Fira Code', 'Roboto Mono', Menlo, monospace. Utilizada para códigos alfanuméricos (DEP.01, VALV.03), coordenadas y valores numéricos para evitar confusiones de lectura.*

5.2. Selección de Tema de Colores

- ***Naval Dark (Fondo y Barras de Control):*** *#0f172a (Slate 900) - Rigor técnico y descanso ocular.*

- ***Hydraulic Blue (Primario / Agua Potable):*** *#0284c7 (Sky 600) y #0369a1 (Sky 700).*

- ***Operational Green (Operación Normal / Activo Conforme):*** *#16a34a (Emerald 600).*

- ***Alert Red (Válvula Cerrada / Alerta de Mantenimiento):*** *#dc2626 (Red 600).*

- ***Warning Amber (Mantenimiento Próximo):*** *#d97706 (Amber 600).*

- ***Light Slate (Superficies de Tarjeta y Paneles):*** *#f8fafc con bordes en #e2e8f0.*

5.3. Psicología del Color

El uso del azul profundo transmite serenidad, confianza y precisión de ingeniería, vinculado de forma universal al ciclo del agua potable. Los acentos cromáticos siguen estrictamente la convención industrial internacional de seguridad: verde para disponibilidad de flujo, rojo para cierre o riesgo, y ámbar para revisión preventiva requerida.

5.4. Identidad Gráfica Web

Logotipo vectorial estilizado combinando una gota de agua estilizada con una red de nodos ortogonales, acompañado del claim: "Visor Maderuelo · Infraestructura Hidráulica & Descarbonización".

5.5. Usabilidad (UX)

Principio de mínima fricción operativa: ningún dato técnico o acción relevante dista a más de dos clics desde la pantalla principal. Los controles críticos se disponen con un tamaño táctil mínimo de 48x48 píxeles para permitir su pulsación con guantes de trabajo de campo.

5.6. Accesibilidad

Conformidad con las pautas WCAG 2.1 nivel AA. Ratios de contraste de color superiores a 4.5:1 en todos los textos sobre fondos oscuros o claros, soporte para navegación secuencial mediante teclado (TabIndex) y atributos ARIA en todos los modales.

5.7. Compatibilidad

Comportamiento homogéneo garantizado en Google Chrome, Microsoft Edge, Mozilla Firefox y Apple Safari, tanto en sistemas de escritorio (Windows, macOS, Linux) como móviles (Android, iOS/iPadOS).

5.8. Diseño Responsivo (Responsive Web Design)

Uso de CSS Grid y Flexbox junto con Media Queries para alternar entre el modo escritorio (paneles laterales persistentes a la izquierda y derecha del mapa) y el modo móvil/tablet (paneles acoplables inferiores tipo Bottom Sheets que se repliegan para dejar visible el mapa).

5.9. Sketches, Wireframes, Mockup con Rejillas y Prototipos

Evolución desde bocetos a mano alzada de la arquitectura de pantalla, estructuración en wireframes de baja fidelidad en cuadrícula de 12 columnas, mockups digitales de alta fidelidad con paleta definitiva y prototipo funcional interactivo en HTML5/CSS3.

6. Fase de Contenido

6.1. Identificar Secciones

- ***Sección 1: Lienzo Cartográfico Principal:*** *Control de capas (OSM, Satélite, Tuberías, Válvulas, Depósito, Flechas de Flujo).*

- ***Sección 2: Barra de Búsqueda y Filtros Rápidos:*** *Selector de tipo de activo y campo de texto predictivo.*

- ***Sección 3: Panel Lateral / Modal BIM-GMAO:*** *Ficha técnica del activo seleccionado con pestañas de Datos Constructivos, Requisitos ISO 19650 y Calendario de Mantenimiento.*

- ***Sección 4: Cuadro de Mando de Descarbonización:*** *Calculadora analítica de emisiones ISO 14064-1 y botón de descarga de informe PDF.*

- ***Sección 5: Leyenda Cartográfica Dinámica:*** *Información sobre diámetros, simbología y estados operativos.*

6.2. Identificar Plantillas

- *Plantilla de Popup para Activos Lineales (Tuberías: longitud, DN, rugosidad, pérdida de carga teórica).*

- *Plantilla de Popup para Nodos Singulares (Depósitos y Bombas: volumen, cotas, potencia de bombeo).*

- *Plantilla de Popup para Valvulería (Válvulas reguladoras, compuertas, ventosas: presión consigna, posición).*

- *Plantilla Documental de Informe Oficial en PDF (Encabezado institucional, tablas formateadas, firmas técnicas).*

6.3. Recopilar Textos

Integración de textos técnicos procedentes de las memorias de proyecto de Maderuelo, protocolos oficiales de mantenimiento (guías CEDEX, AWWA, DVGW) y descriptores de factores de emisión oficiales de la Oficina Española de Cambio Climático (OECC / MITECO).

6.4. Identificar Menús de Navegación y Mapa de Navegación

Menú superior flotante horizontal con iconos directos: [Capas] [Buscador] [GMAO] [Calculadora GEI] [Acerca del Proyecto]. Mapa de navegación plano sin jerarquías profundas que desorienten al operario en campo.

7. Fase de Construcción

7.1. Diagrama de Despliegue

Arquitectura desacoplada sin servidor de aplicaciones intermedio. Los activos estáticos (HTML, CSS, JS, GeoJSON) se sirven directamente desde una red de entrega de contenidos (CDN) protegida mediante TLS 1.3 hacia los navegadores de los clientes finales.

7.2. Diagrama de Componentes

- *LeafletMapCore: Instancia de mapa, gestión de teselas y eventos de zoom/pan.*
- *LayerManager: Carga, estilizado condicional y control de visibilidad de capas GeoJSON.*
- *IdsValidationEngine (Pre-build Python): Verificación de esquemas IFC con ifctester.*
- *SearchEngine: Filtrado alfanumérico y ordenación de activos.*
- *GmaoModule: Despachador de fichas técnicas y tareas normativas.*
- *CarbonCalculator: Lógica aritmética de factores de emisión.*
- *JsPdfEngine: Compilación y serialización del documento PDF.*

7.3. Arquitectura de Tres Fases

- ***Diseño de Base de Datos / Almacén Geoespacial:** Estructura GeoJSON normalizada (RFC 7946) con atributos semánticos derivados de clases IFC y tablas COBie:*

```
{
                    "type": "Feature",
                    "id": "DEP.01",
  "geometry": { "type": "Point", "coordinates": [-3.5218, 41.4862] },
                    "properties": {
                        "Tag": "DEP.01",
                "Nombre": "Depósito General Maderuelo",
                        "IfcClass": "IfcWaterTank",
                        "CapacidadUtil_m3": 500,
                        "CotaCoronacion_m": 985.40,
                        "CotaSolera_m": 980.20,
                "Material": "Hormigón Armado",
                "PlanMantenimiento": "PM-DEP-ANUAL",
                        "Estado": "Operativo"
                    }
}
```

- ***Programación Intermedia (Lógica de Integración y Scripts de Datos):** Scripts en Python desarrollados con ifcopenshell para transformar las entidades 3D IFC a capas planas 2D*

GeoJSON, ejecutando previamente la auditoría con ifctester frente a las especificaciones IDS del proyecto.

- ***Programación de Interfaz (Frontend):*** *Código nativo JavaScript moderno (ES6+), modular, sin pesados frameworks que sobrecarguen el navegador, utilizando manipulación limpia del DOM y llamadas asíncronas (async/await).*

8. Fase de Testeo (Plan Integral de Pruebas)

8.1. Pruebas de Sistema, Unidad e Integración

- ***Pruebas Unitarias:*** *Comprobación de funciones matemáticas de cálculo de emisiones (CO_2e) con valores de prueba controlados para verificar que la tolerancia de redondeo sea cero.*

- ***Pruebas de Integración:*** *Comprobación de que la pulsación sobre un elemento en la capa de tuberías transmita correctamente sus propiedades al constructor del popup y actualice el índice de búsqueda.*

- ***Pruebas de Sistema:*** *Ejecución integral del flujo de trabajo: carga de capas, búsqueda de válvula, conmutación de estado a "Cerrada", recálculo de huella energética y generación del PDF.*

8.2. Pruebas de Aceptación

Validación formal junto con los técnicos municipales de Maderuelo sobre el terreno, contrastando la ubicación marcada en el visor con las coordenadas GPS reales de arquetas, bocas de riego y válvulas de seccionamiento.

8.3. Batería de Pruebas para Aplicaciones Web

- ***Pruebas de Humo (Smoke Tests):*** *Verificación inmediata de que el HTML levanta el mapa base de Leaflet sin errores críticos en la consola de JavaScript.*

- ***Pruebas de API:*** *Comprobación de la respuesta HTTP 200 y tiempos de respuesta inferiores a 300 ms en los servidores de teselas de OpenStreetMap y CartoDB.*

- ***Pruebas Exploratorias y de Cordura:*** *Navegación errática intencionada, zoom extremo y consultas de Tags inexistentes para validar la resistencia a fallos.*

- ***Compatibilidad y Usabilidad:*** *Verificación de interacción fluida en resoluciones desde 360x640 (móviles) hasta 3840x2160 (pantallas 4K de oficina técnica).*

- ***Rendimiento (Velocidad) y Carga:*** *Evaluación con Google Lighthouse, alcanzando puntuaciones superiores a 95/100 en Rendimiento, Mejores Prácticas y Accesibilidad. Tiempo al primer byte (TTFB) < 80 ms en CDN.*

- ***Contraste y Accesibilidad:*** *Auditoría automatizada con axe-core para certificar el cumplimiento de contraste WCAG AA en todos los elementos textuales.*

- ***Seguridad:*** *Verificación de ausencia de inyecciones XSS en el buscador de texto mediante el saneamiento estricto de entradas de usuario.*

9. Fase de Mercadeo, Publicidad y Protección Legal

9.1. Registro de Derechos de Autor y Propiedad Intelectual

Inscripción del software bajo licencia abierta institucional (EUPL v1.2 / MIT adaptada a administraciones públicas), garantizando los derechos de autor intelectual de los investigadores y permitiendo su reutilización por otros municipios similares.

9.2. Compra del Dominio Web y Certificados SSL

Asignación de subdominio institucional municipal (ej. visor.maderuelo.es o repositorio de proyecto oficial). Despliegue de certificados de cifrado TLS/SSL gratuitos y automatizados emitidos por Let's Encrypt o Cloudflare con renovación semestral automática.

9.3. Plan de Difusión Técnica

Presentación del proyecto en congresos de ingeniería hidráulica y jornadas técnicas de OpenBIM y Smart Cities, acompañado de artículos de transferencia tecnológica sobre la digitalización del ciclo del agua en pequeños municipios.

10. Fase de Despliegue

10.1. Plan de Implementación a la Nube y Despliegue de Infraestructura IT

Configuración de flujo de integración y despliegue continuo (CI/CD) mediante GitHub Actions: cada actualización en la rama principal desencadena la compilación automática, validación de sintaxis de los ficheros GeoJSON y despliegue en menos de 60 segundos en los puntos de presencia CDN globales.

10.2. Aseguramiento de la Infraestructura

Configuración de directivas de seguridad en cabeceras HTTP (Content Security Policy - CSP, X-Content-Type-Options: nosniff, Strict-Transport-Security - HSTS) para evitar suplantaciones de contenido o ataques de intermediario (MitM).

10.3. Medición del Rendimiento en Producción, Analítica Web y Posicionamiento

Integración de herramientas de analítica web respetuosas con la privacidad y conformes con el RGPD (como Plausible o Cloudflare Web Analytics, sin cookies invasivas), midiendo el número de consultas de activos por jornada y los tiempos de latencia reales experimentados por los usuarios en campo.

11. Fase de Operación y Monitoreo

11.1. Monitoreo Continuo

Supervisión automática de disponibilidad (Uptime) 24/7 mediante sondas externas con alertas instantáneas vía webhook si la disponibilidad cae por debajo del 99,9%.

11.2. Seguridad Operativa

Auditorías periódicas de las dependencias externas (CDN de Leaflet, FontAwesome y jsPDF) mediante herramientas de escaneo de vulnerabilidades conocidas (CVE) y verificación de integridad de subrecursos (SRI - Subresource Integrity).

11.3. Mantenimiento y Actualización Continua

- ***Mantenimiento Correctivo:*** *Subsanación inmediata de discrepancias geométricas en tuberías detectadas tras obras de reparación en las calles de Maderuelo.*

- ***Mantenimiento Adaptativo:*** *Actualización anual de los factores oficiales de emisión de la mezcla eléctrica publicados por el MITECO para el módulo de huella de carbono.*

- ***Mantenimiento Evolutivo:*** *Futura incorporación de modelos hidráulicos de simulación en tiempo real (EPANET compilado en WebAssembly) y conexión con telelectura de contadores inteligentes.*

Aquí deja de redactar la inteligencia artificial

6. CASO DE ESTUDIO

6.1. Elección del caso de estudio y justificación

Para poner en práctica la propuesta metodológica de este trabajo de investigación se parte de las siguientes premisas:

- Municipios fuera de la Comunidad de Madrid
- Municipio de pequeña entidad (superficie de casco urbano pequeña)
- Disponibilidad y facilidad de acceso a la información de la red de distribución de agua potable del municipio a través de portales web.
- Distancia y tiempos de desplazamiento desde Madrid razonables para realizar dos visitas.

Con estas premisas, en primer lugar, se realiza un filtro excluyente y a continuación se realiza un análisis multicriterio combinando dos metodologías: el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para la ponderación de criterios y TOPSIS (o suma ponderada normalizada) para seleccionar la ubicación ideal.

6.1.1. Filtro excluyente:

Los condicionantes que van a ser empleados para el filtro excluyente son los siguientes:

- Municipios dentro de la Comunidad de Madrid.
- Sin disponibilidad a la información de la red de distribución de agua potable del municipio a través de portales web.
- Tiempo de desplazamiento desde Madrid superior a 2 horas.

Para la aplicación del método se emplea el programa QGIS como Sistema de Información Geográfica el cual permite incorporar las entidades de Poblaciones (descargados del Centro de Descarga del

Instituto Geográfico Nacional) y el resto de las entidades necesarias tanto para el filtro excluyente como para el análisis multicriterio.

A continuación, mediante la aplicación Duración del trayecto de Google Maps se determina la zona donde los viajes en coche son inferiores a 2 horas. Esta superficie se digitaliza y se incorpora a la aplicación QGIS para excluir los municipios que se encuentren fuera del área.

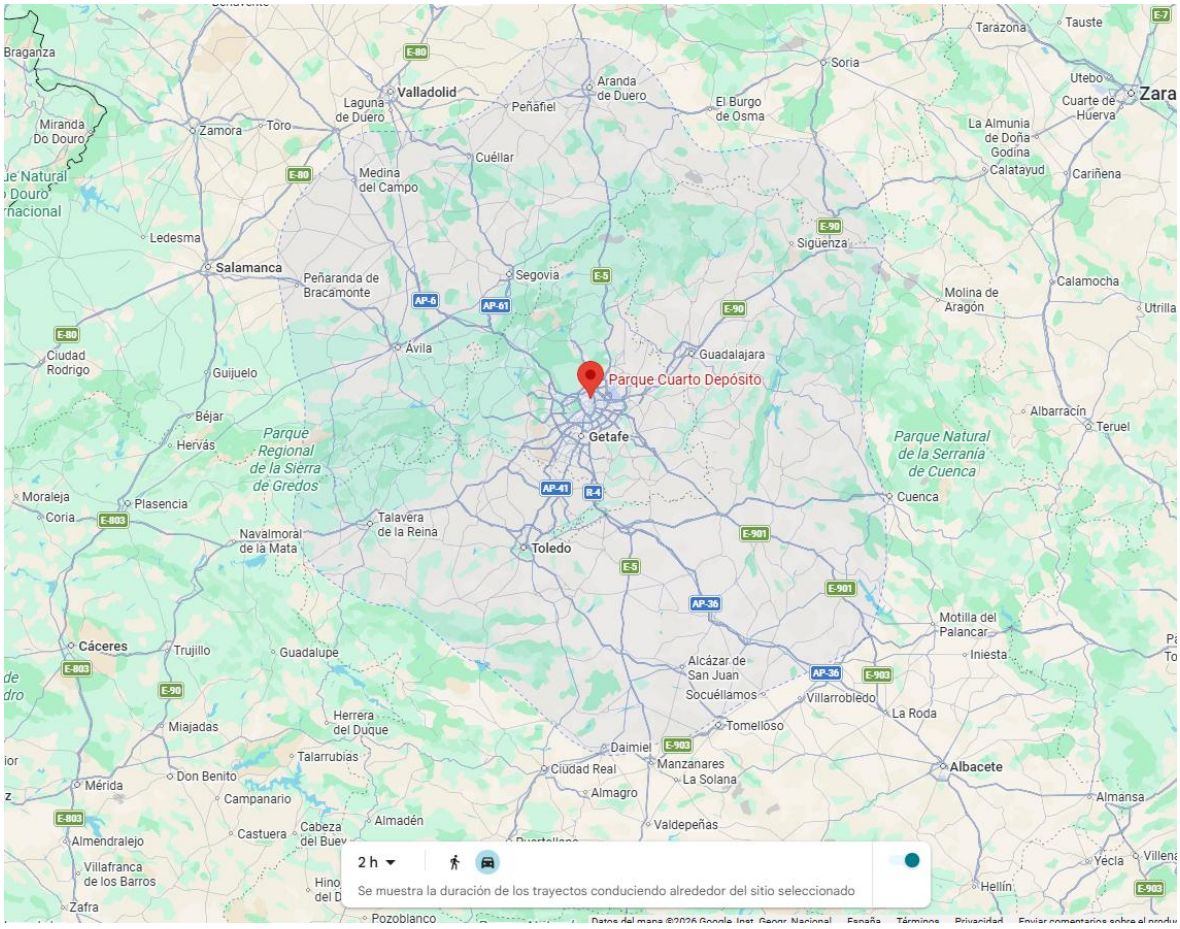


Figura 26. Herramienta Duración del trayecto de 2 horas en coche en Google Maps. Elaboración propia

Debido al gran número de municipios obtenidos (2001), se decide establecer un criterio de superficie en función del rendimiento para la toma de datos y el número de elementos disponibles en la red. Para obtener una muestra representativa (25-30 elementos) se estima por experiencia la existencia de 1 elemento por hectárea (100m x 100m) en núcleos urbanos de baja densidades. Por ello se establece una superficie entre 25 y 30 hectáreas de superficie de Casco Urbano, obteniéndose un resultado de 81 municipios.

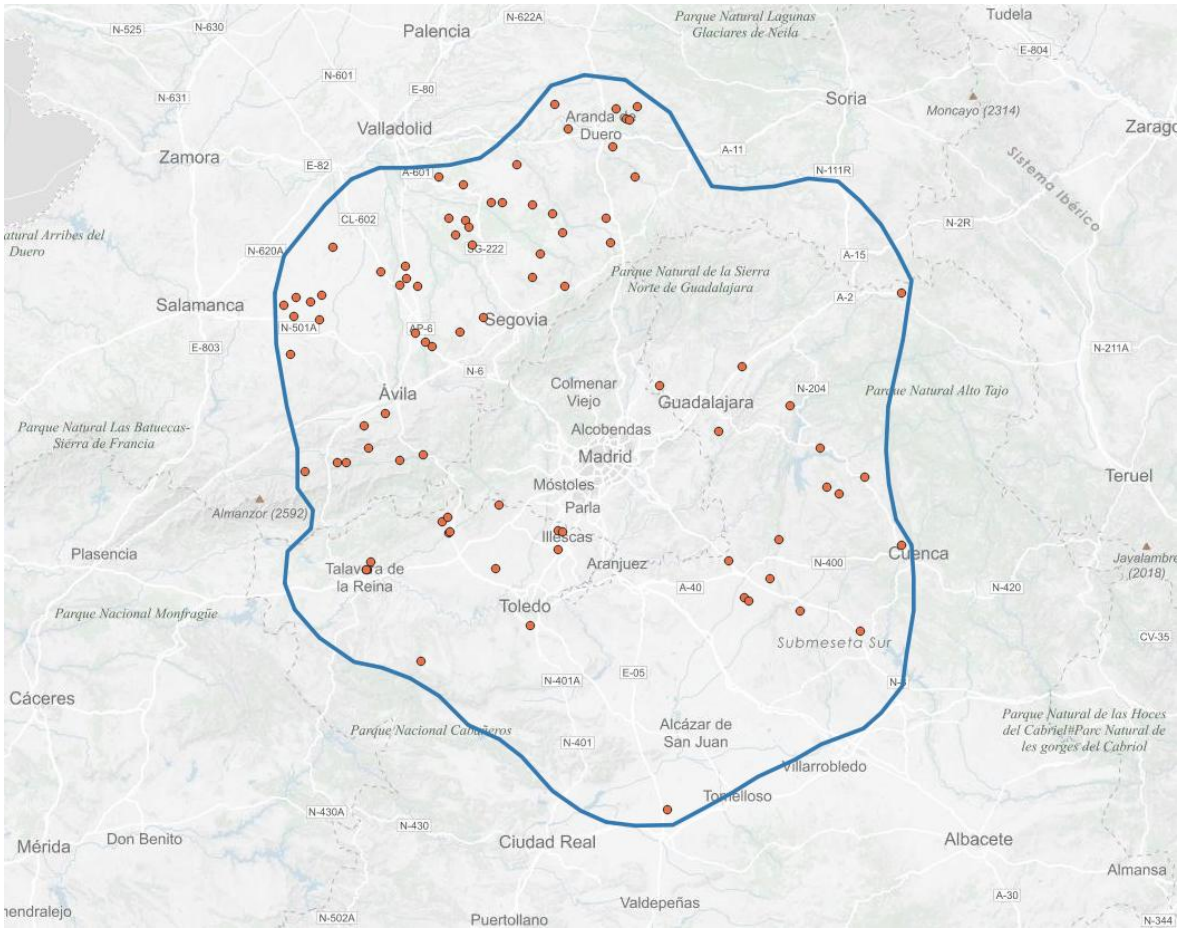


Figura 27. Municipios resultantes con el filtro de superficie entre 25 y 30 hectáreas. Elaboración propia

Por último, a los municipios filtrados se le incorporará una tabla en la que se incluye mediante la consulta de los visores de planeamiento urbanístico de las comunidades autónomas de Castilla y León (Visor IDECyL) y Castilla la Mancha (Sistema de Información Urbana de Castilla-La Mancha) si existe información de la red de distribución de agua potable en las diferentes figuras de planeamiento municipal (PGOU, POM, DSU, PDSU, NNSS…) y si en esa información se incluyen los elementos de la red de distribución (valvulería) y si hay depósito de almacenamiento de agua.

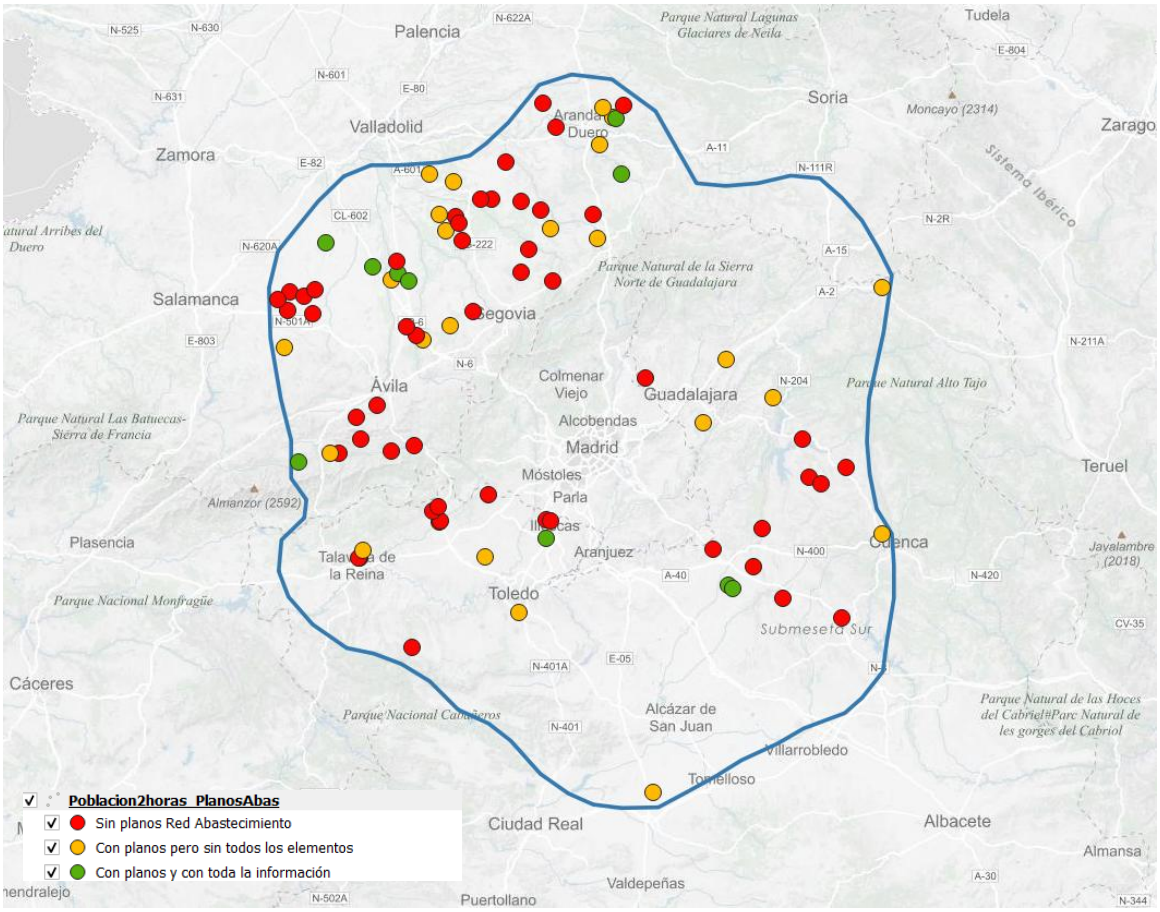


Figura 28. Municipios y estado de la información sobre la red de abastecimiento. Elaboración propia

Los municipios que no disponen de información completa se excluyen para el análisis multicriterio, quedando para el análisis 10 municipios.

Tabla 16. Municipios con información completa en el Planeamiento de la red de distribución. Elaboración propia

Municipio	Habitantes (Censo 2024)	Provincia	Superficie (km²)
Bobadilla del Campo	279	Valladolid	0,280
Codorniz	213	Segovia	0,291
El Acebrón	231	Cuenca	0,257
Maderuelo	93	Segovia	0,263
Navarredonda de Gredos	281	Ávila	0,289
Palacios de Goda	316	Ávila	0,282

Municipio	Habitantes (Censo 2024)	Provincia	Superficie (km²)
Pozuelo	303	Toledo	0,269
Rapariegos	196	Segovia	0,280
Torrubia del Campo	313	Cuenca	0,287
Zazuar	208	Burgos	0,275

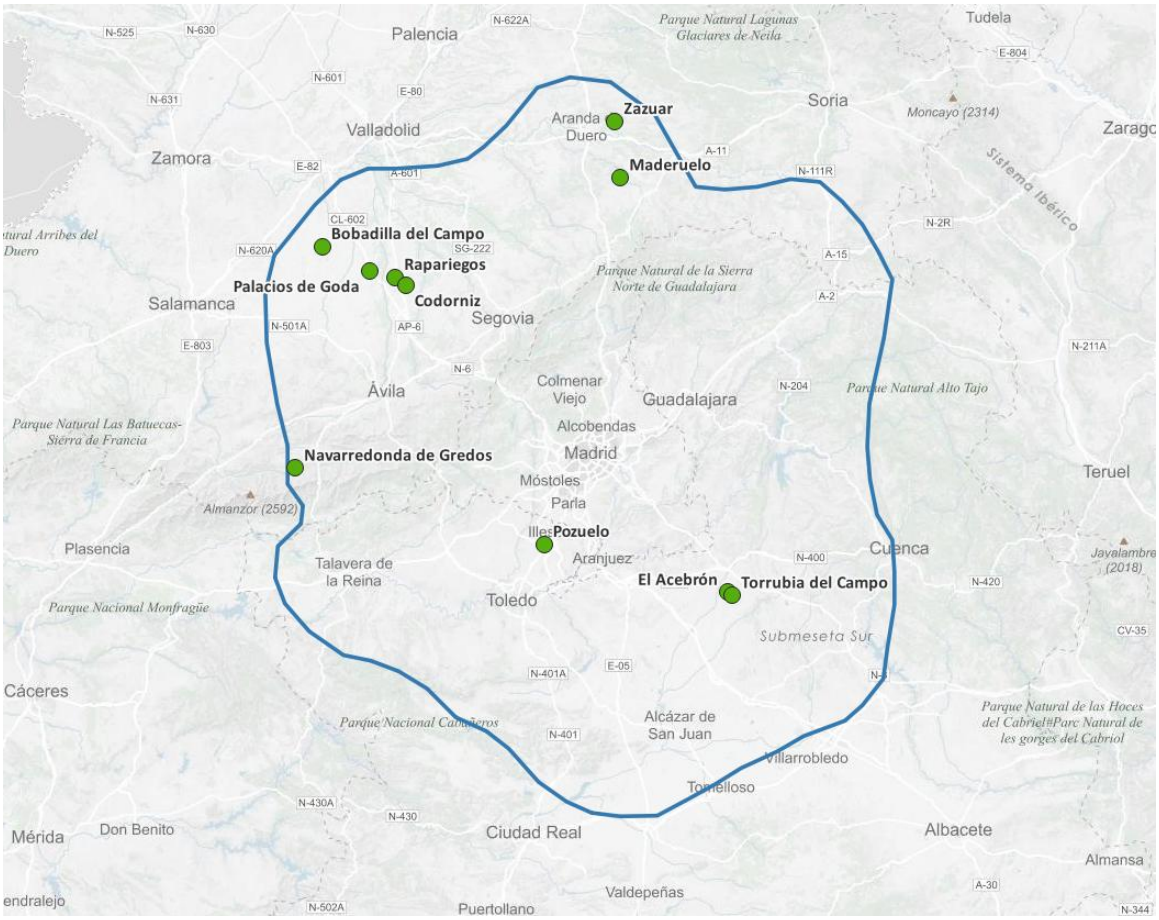


Figura 29. Mapa con los municipios resultantes con toda la información en el Planeamiento de la red de abastecimiento. Elaboración propia

6.1.2. Análisis multicriterio

Para el análisis tipo AHP, primero se identificarán los datos de la muestra (las valoraciones que se han dado a los distintos aspectos del municipio y de la información de la red de distribución obtenida), se definirán los criterios de beneficio y coste y después se normalizarán las variables para calcular los pesos mediante la matriz Saaty (AHP). Una vez obtenida la matriz, se obtendrá el ratio

de consistencia y se comprobará que queda por debajo del 10%. Comprobado que el ratio de consistencia es adecuado, se confecciona la matriz de puntuaciones normalizadas para poder aplicar los pesos normalizados y obtener las puntuaciones de cada municipio.

- **Datos de la muestra**

A los datos ya empleados en el apartado anterior para filtrar los municipios, se han añadido otras variables que tienen que ver con la información de los datos disponibles de la red de abastecimiento, si se posee contacto en el Ayuntamiento que pueda facilitar el acceso a la información o el tiempo de viaje. A continuación se definen los parámetros empleados y la justificación de las unidades:

- Año del plano:
    - Descripción: Año de elaboración del plano que representa la red de distribución.
    - Criterio de ponderación: Tendrá mayor puntuación los planos que posean más antigüedad frente a los más nuevos. Esta premisa parte para darle utilidad a la información y a la elaboración del trabajo de investigación para que, si el Ayuntamiento lo quiere, se le pueda facilitar la red digitalizada.
- Calidad de la información:
    - Descripción: Puntuación del 1 al 5 del formato y representación de la red de distribución con el fin de ser digitalizada.
    - Criterio de ponderación: Tendrá mayor peso los planos que estén en formato vectorial (exportados de un programa de dibujo asistido por ordenador o un sistema de información geográfica) y menor peso los que por su delineación haya grandes dificultades a la hora de digitalizarlos y georrefenciarlos.
        - 1 punto: No se puede digitalizar directamente.
        - 2 puntos: Dificultad alta de georreferenciación y proceso de digitalización.

        - 3 puntos: Dificultad media de georreferenciación y proceso de digitalización.

        - 4 puntos: Dificultad baja de georrefenciación y proceso de digitalización.

        - 5 puntos: Planos en formato vectorial

- Contacto municipal:

    - Descripción: Existencia de contacto con el Ayuntamiento o con personas que puedan facilitar el acceso a la información de la red de distribución.

    - Criterio de ponderación: Si (1) o No (0)

- Superficie del casco urbano:

    - Descripción: Superficie en kilómetros cuadrados del área de Casco Urbano reflejado en los diferentes instrumentos de planeamiento urbanístico.

    - Criterio de ponderación: Tendrá mayor puntuación los municipios con menor superficie de Casco Urbano frente a los que más superficie tienen para facilitar la toma de datos en campo.

- Tiempos de desplazamiento:

    - Descripción: Tiempo en horas calculado mediante Google Maps del desplazamiento desde Madrid a los municipios a valorar.

    - Criterio de ponderación: Tendrá más peso los tiempos más reducidos frente a los tiempos más largos para facilitar los viajes en la toma de datos.

- Habitantes:

    - Descripción: Número de habitantes del Censo de Vivienda del INE de 2024

- Criterio de ponderación: Tendrá mayor puntuación las poblaciones con menor número de habitantes como parámetro de complemento a la superficie del casco urbano.

Tabla 17. Tabla de muestreo con las propiedades por cada municipio. Elaboración propia

Municipio	Provincia	Año del plano	Calidad Información	Contacto municipal	Superficie Suelo Urbano (km²)	Tiempos de desplazamiento (h)	Habitantes
Bobadilla del Campo	Valladolid	2000	1	0	0,280	2	279
Codorniz	Segovia	2009	4	0	0,291	1,67	213
El Acebrón	Cuenca	2012	3	0	0,257	1,16	231
Maderuelo	Segovia	2004	2	1	0,263	1,45	93
Navarredonda de Gredos	Ávila	2004	2	1	0,289	2	281
Palacios de Goda	Ávila	1999	2	0	0,282	1,75	316
Pozuelo	Toledo	2007	5	0	0,269	0,75	303
Rapariegos	Segovia	1997	3	0	0,280	1,72	196
Torrubia del Campo	Cuenca	2007	4	0	0,287	1,22	313
Zazuar	Burgos	2011	5	0	0,275	1,7	208

- **Jerarquía y naturaleza de las variables**

El siguiente paso es definir que variables tendrán mayor peso clasificándolas de mayor importancia a menor importancia.

De igual manera, se tiene que definir la naturaleza de las variables según el AHP siendo las dos opciones: beneficio y coste. Las variables beneficio son las que en el criterio de ponderación anterior

se la da mayor idoneidad a las muestras con mayor valor cuantitativo y las variables coste al contrario (menor idoneidad a las muestras con mayor valor cuantitativo).

Tabla 18. Jerarquía y naturaleza de las variables para análisis AHP. Elaboración propia

Criterio	**Orden**	**Naturaleza**	**Coeficiente AHP**
Contacto municipal	1	Beneficio	C1
Tiempos de desplazamiento	2	Coste	C2
Calidad de la información	3	Beneficio	C3
Año del plano	4	Beneficio	C4
Superficie del suelo urbano	5	Coste	C5
Habitantes	6	Coste	C6

- **Normalización de las variables**

Dado que la tipología de datos es diversa (años, puntuaciones, superficies, tiempos) es necesario normalizar los datos. Para ello se decide aplicar una normalización lineal mínimo-máximo de los datos del muestreo entre 0 y 1.

Dependiendo del tipo de variables (Coste o Beneficio) habrá que aplicar la siguiente formulación:

$$r_{ij}\left(\text{Beneficio}\right)=\frac{\left(x_{ij}-x_{j,\min}\right)}{\left(x_{j,\max}-x_{j,\min}\right)}$$

$$r_{ij}\left(\text{Coste}\right)=\frac{\left(x_{j,\max}-x_{ij}\right)}{\left(x_{j,\max}-x_{j,\min}\right)}$$

Tabla 19. Límites para normalización de variables. Método AHP. Elaboración propia

Criterio	Naturaleza	Valor máximo $x_{max} = 1$	Valor mínimo $x_{min} = 0$
C1 - Contacto municipal	Beneficio	0	1
C2 - Tiempos de desplazamiento	Coste	0,75 h	2,00 h
C3 - Calidad de la información	Beneficio	1	5
C4 - Año del plano	Beneficio	1997	2012
C5 - Superficie del suelo urbano	Coste	0,257 km²	0,291 km²
C6 - Habitantes	Coste	93 hab	316 hab

- **Matriz de variables normalizadas**

Definido el criterio de normalización, se procede a la confección de la matriz de variables normalizadas según los datos del muestreo.

Tabla 20. Matriz de variables normalizadas. Método AHP. Elaboración propia

Municipio	Año del plano	Calidad Información	Contacto municipal	Superficie Suelo Urbano (km²)	Tiempos de desplazamiento (h)	Habitantes
Bobadilla del Campo	0,200	0,000	0,000	0,324	0,000	0,166
Codorniz	0,800	0,750	0,000	0,000	0,264	0,462
El Acebrón	1,000	0,500	0,000	1,000	0,672	0,381
Maderuelo	0,467	0,250	1,000	0,824	0,440	1,000
Navarredonda de Gredos	0,467	0,250	1,000	0,059	0,00	0,157

Municipio	**Año del plano**	**Calidad Información**	**Contacto municipal**	**Superficie Suelo Urbano (km²)**	**Tiempos de desplazamiento (h)**	**Habitantes**
Palacios de Goda	0,133	0,250	0,000	0,265	0,200	0,000
Pozuelo	0,667	1,000	0,000	0,647	1,000	0,058
Rapariegos	0,000	0,500	0,000	0,324	0,224	0,538
Torrubia del Campo	0,667	0,750	0,000	0,013	0,624	0,013
Zazuar	0,933	1,000	0,000	0,484	0,240	0,484

- **Matriz de pesos**

En el análisis AHP, es necesario definir la matriz de pesos. Esta matriz es del orden del número de variables o criterios considerados según el orden jerárquico establecido (C1 a C6). Los coeficientes aumentan en n+1 según se avanza en columnas (preferencia de C1 sobre C2) y disminuye 1/n según se avanza en filas (preferencia de C1 sobre C2, si la preferencia fuera al contrario, aumentaría el coeficiente).

Tabla 21. Matriz de pesos. Método AHP. Elaboración propia

Crit.	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	2	3	4	5	6
C2	0,500	1	2	3	4	5
C3	0,333	0,500	1	2	3	4
C4	0,250	0,333	0,500	1	2	3
C5	0,200	0,250	0,333	0,500	1	2
C6	0,167	0,200	0,250	0,333	0,500	1

- **Obtención del vector de pesos y Ratio de Consistencia (CR)**

El vector de pesos se obtiene con la media geométrica de la fila frente a la suma total de todas las medias geométricas de las filas.

Tabla 22. Matriz para la obtenicón de vector de pesos y CR. Método AHP. Elaboración propia

Crit.	C1	C2	C3	C4	C5	C6		P	Π		ω
C1	1	2	3	4	5	6		720	**2,994**		**0,381**
C2	0,500	1	2	3	4	5		60	**1,979**		**0,252**
C3	0,333	0,500	1	2	3	4		4	**1,260**		**0,160**
C4	0,250	0,333	0,500	1	2	3		0,250	**0,794**		**0,101**
C5	0,200	0,250	0,333	0,500	1	2		0,167	**0,505**		**0,064**

C6	0,167	0,200	0,250	0,333	0,500	1		0,001	**0,334**		**0,042**
								ΣΠ	**7,866**	**Σω**	**1,000**

Para comprobar que la matriz es consistente, es necesario calcular el Ratio de Consistencia (CR), el cual es el cociente entre el Índice de Consistencia (CI) y la Consistencia aleatoria.

El CI se calcula empleando el autovalor máximo de la matriz de pesos (λ_{max}) y el orden de dicha matriz (n):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{6{,}122 - 6}{6 - 1} = 0{,}025$$

Una vez obtenido el CI, se puede calcular el Ratio de Consistencia con el cociente entre el Índice de Consistencia y la Consistencia aleatoria determinada por Saaty según el orden de la matriz de pesos:

Tabla 23: Valores de la consistencia aleatoria en función del tamaño de la matriz [J. Anzar & F. Guijarro]

n_{orden}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cons. Aleat.	0,00	0,00	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

$$CR = \frac{CI}{Cons.Aleat.} = \frac{0{,}025}{1{,}24} = 0{,}020$$

Según Saaty, para una matriz de orden 5 o mayor tiene que tener un ratio de consistencia (CR) por debajo del 10% (0,100) [J. Anzar & F. Guijarro]. En este caso cumple, por lo que podemos proceder al cálculo de la matriz de puntuaciones.

- **Resultados por municipio**

La puntuación total por municipio se obtendrá multiplicando la matriz de puntuaciones por el vector de pesos (ω):

Tabla 24. Matriz de puntuaciones por municipio. Método AHP. Elaboración propia

	C1 - Contacto municipal	C2 - Tiempos de desplazamiento	C3 - Calidad de la información	C4 - Año del plano	C5 - Superficie del suelo urbano	C6 - Habitantes	**Suma**
ω	*0,381*	*0,252*	*0,16*	*0,101*	*0,064*	*0,042*	*1,000*
Bobadilla del Campo	0,000	0,000	0,000	0,020	0,021	0,007	**0,048**
Codorniz	0,000	0,067	0,120	0,081	0,000	0,019	**0,287**
El Acebrón	0,000	0,169	0,080	0,101	0,064	0,016	**0,430**
Maderuelo	0,381	0,111	0,040	0,047	0,053	0,042	**0,674**
Navarredonda de Gredos	0,381	0,000	0,040	0,047	0,004	0,007	**0,479**
Palacios de Goda	0,000	0,050	0,040	0,013	0,017	0,000	**0,121**
Pozuelo	0,000	0,252	0,160	0,067	0,041	0,002	**0,523**
Rapariegos	0,000	0,056	0,080	0,000	0,021	0,023	**0,180**
Torrubia del Campo	0,000	0,157	0,120	0,067	0,001	0,001	**0,346**
Zazuar	0,000	0,060	0,160	0,094	0,031	0,020	**0,366**

El municipio de Maderuelo ha obtenido la mejor puntuación (0,674). En un principio parecía que iba a estar más próximo a Navarredonda de Gredos debido a que el contacto municipal da más de la mitad de la puntuación, pero su área de trabajo y su población reducidas hace que sea el municipio ideal para aplicar la metodología recogida en esta investigación.

Por lo tanto, **se selecciona el municipio de Maderuelo como caso de estudio para esta investigación**.

6.2. Aplicación de la metodología propuesta

A continuación se desarrolla la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo de investigación en el municipio de Maderuelo.

6.2.1. Fase I: Inventario de la red

6.2.1.1. Determinación del Escenario

Para la determinación del escenario entre las propuestas aportadas por la metodología es necesario revisar la documentación existente de la red de distribución.

- **Trabajo de gabinete:**

En el caso de Maderuelo, la información disponible en Internet es:

- Plano de la red de distribución del año 2004
    - Formato imagen (PDF escaneado)
    - Sin georreferenciar y sin elementos de referencia de georreferenciación directa (cruz con coordenadas y un sistema de coordenadas asociado)
    - Sin información de materiales o diámetros de los elementos de la red.
- Concesión de aprovechamiento de aguas subterráneas del equipo de bombeo de la red de Maderuelo publicado en el Boletín Oficial de la Provincia de Segovia el 6 de junio de 2022.
    - Información del caudal máximo instantáneo.
    - Volumen máximo anual.
    - Características del equipo de bombeo.

- **Trabajo en campo:**

En el mes de mayo se visita el municipio y se consulta al Ayuntamiento si dispone de más información de la que obra en los planos de las normas subsidiarias de Maderuelo con un resultado negativo. Se pregunta si se han hecho obras de renovación desde el año 2004 y se confirma la existencia de nuevos elementos de red pero ausencia de la documentación gráfica de la misma.



Figura 30. Plano de la red de abastecimiento incluido en las Normas Subsidiaras de Maderuelo. Visor Planeamiento CYL



Figura 31. Límites del municipio de Maderuelo. Elaboración propia

Por ello, dada la información disponible, se considera que la red de distribución del municipio de Maderuelo se encuentra en un **Escenario 4: Inventario incompleto, sin georreferenciar y sin la totalidad de los datos técnicos de la red.**

6.2.1.2. Digitalización de la cartografía existente.

Para realizar un inventario suficiente para la aplicación de la metodología de la investigación es necesario tener una aproximación de la red de distribución existente digitalizada.

Para realizar la digitalización se emplea la aplicación de código abierto QGIS. Mediante este programa se procede a extraer la imagen del plano de la red de distribución de las normas subsidiarias de Maderuelo mediante las herramientas de georreferenciación.

Dado que hay que apoyarse en alguna referencia para lograr georreferenciar la cartografía de la red de distribución y la realidad, se emplean las ortofotografías de máxima actualidad del Plan Nacional de Ortofotografía Aerea (PNOA) del Centro Geográfico Nacional (IGN).

El sistema de coordenadas empleado es el EPSG:25830 (ETRS89 Huso 30N).

Para obtener una correcta georreferenciación se emplean 3 puntos de referencia, lo más distantes posible para obtener una georreferenciación óptima.

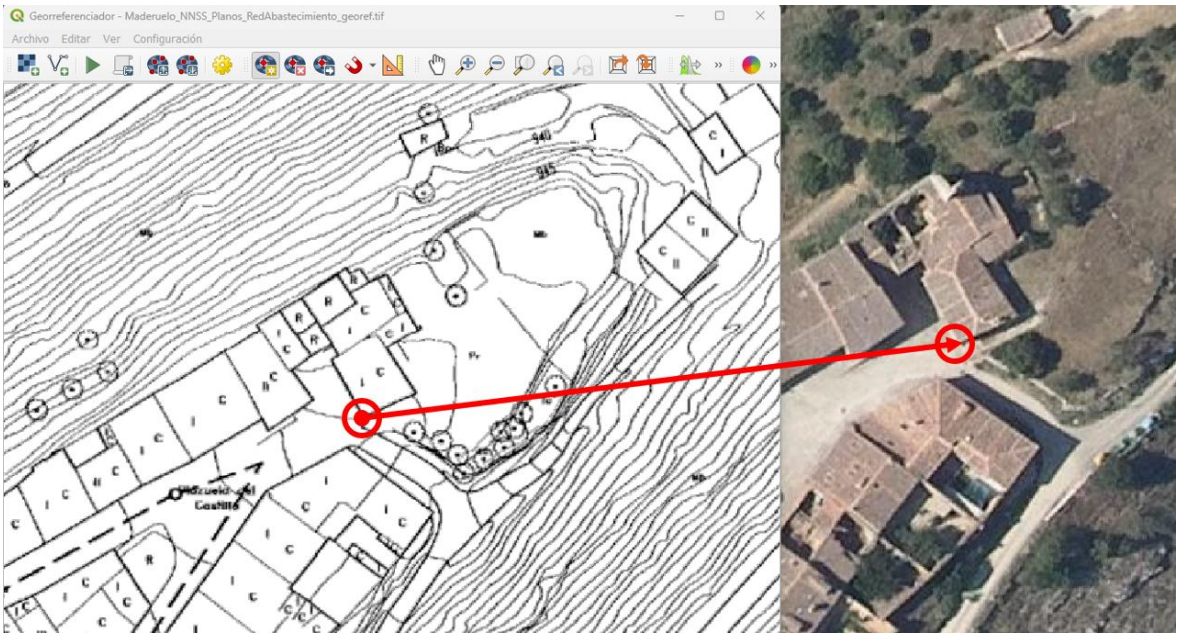


Figura 32. Uno de los 3 puntos de georreferenciación. Elaboración propia



Figura 33. Resultado en la zona del punto expuesto. Georrefenciación. Elaboración propia



Figura 34. Resultado general de la georreferenciación. Elaboración propia

6.2.1.3. Vectorización de los elementos de la red de distribución

Una vez georreferenciado el plano de la red de distribución, se procede a construir la estructura de las entidades, definiendo los atributos requeridos en la metodología ver tabla punto 5.1.2. (datos asociados a las entidades gráficas) que proporcionan los datos técnicos de la red de distribución.

Entidad	Tipo de entidad
Bomba	Punto
Válvula	Punto
Nudo	Punto
Tubería	Polilínea
Depósito	Polígono



Figura 35. Estructura de las entidades digitalizadas. Elaboración propia

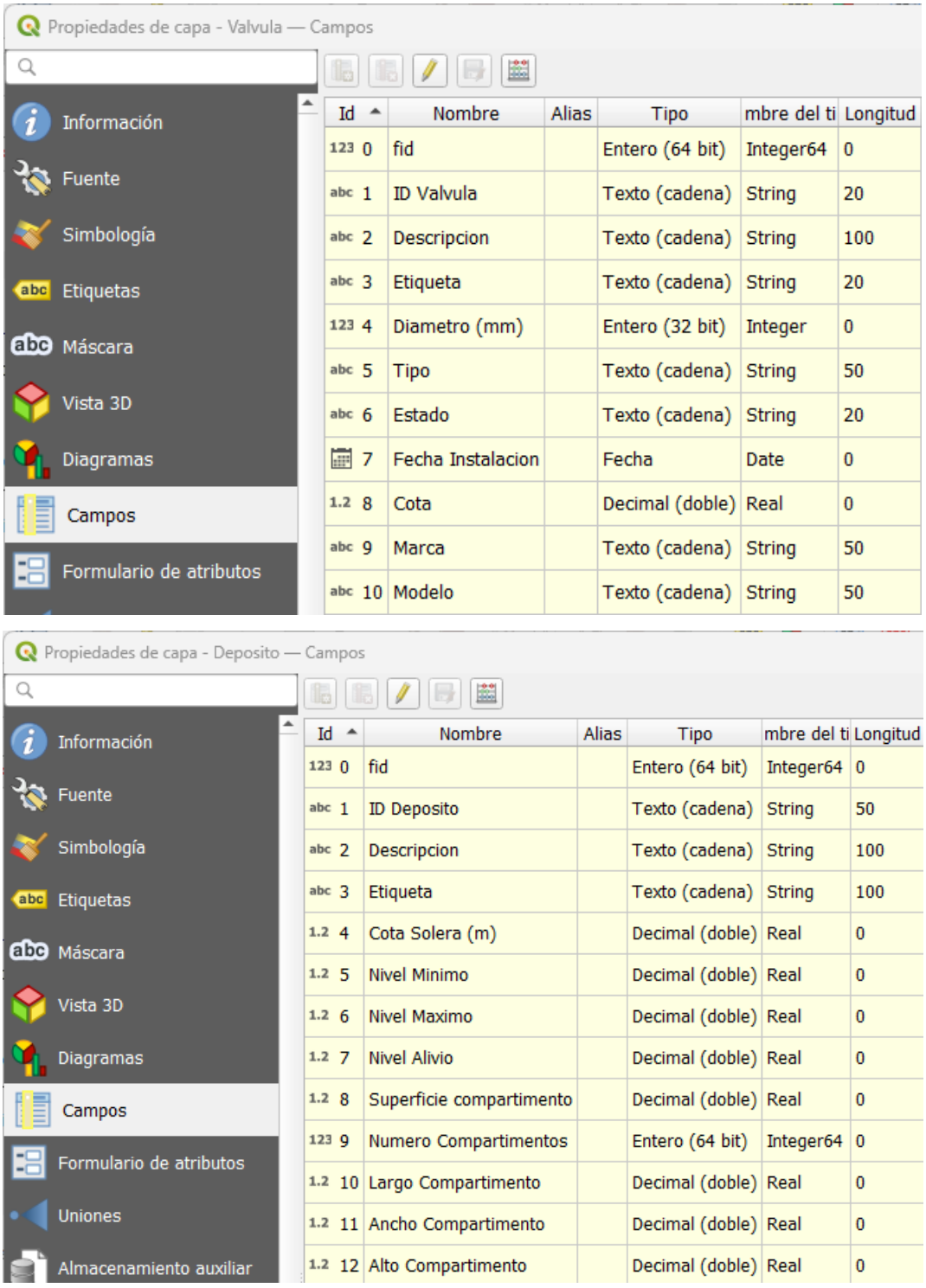


Figura 36. Estructura de campos en varias entidades digitalizadas

Una vez creadas las entidades y definidos sus atributos (campos), se procede a digitalizar la red con los datos que obran en el plano (trazado y tipología de válvulas).

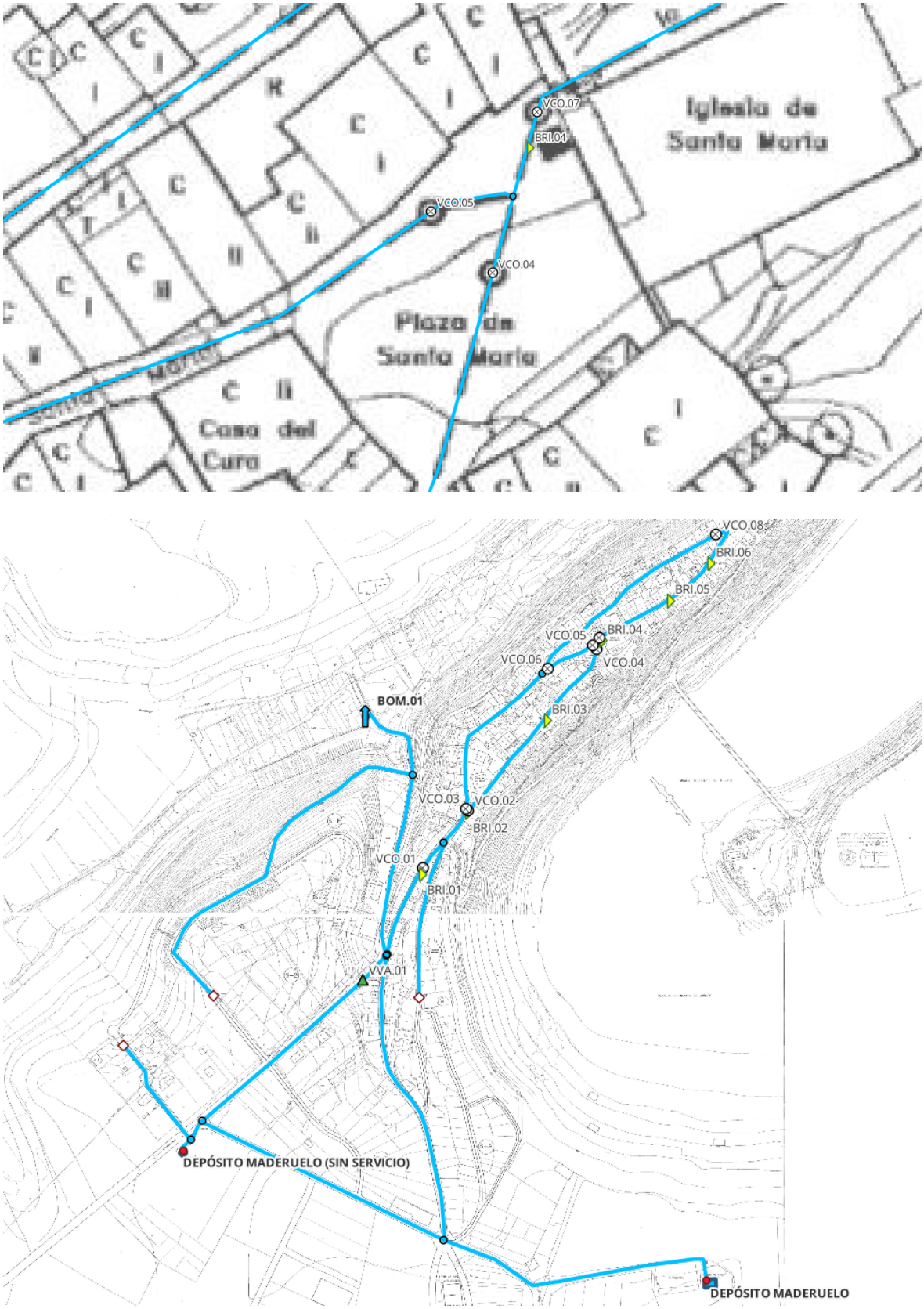


Figura 37. Vectorización de la red de distribución representada en los planos de las NNSS. Elaboración propia

6.2.1.4. Comprobación y toma de datos en campo

Vectorizada la red en el software QGIS, se prepara el modelo y la base de datos en formato GeoPackage para importar dicha información a un dispositivo móvil y usar, como formulario de registro de comprobación y de nueva incorporación de elementos, la aplicación QField.

Para el paso del modelo en QGIS a QField se emplea la extensión denominada QField Sync. Esta aplicación permite crear un directorio en el cual se sincronizan los datos tanto de las modificaciones realizada con QGIS en gabinete, como las modificaciones realizadas en campo a través de la aplicación QField.

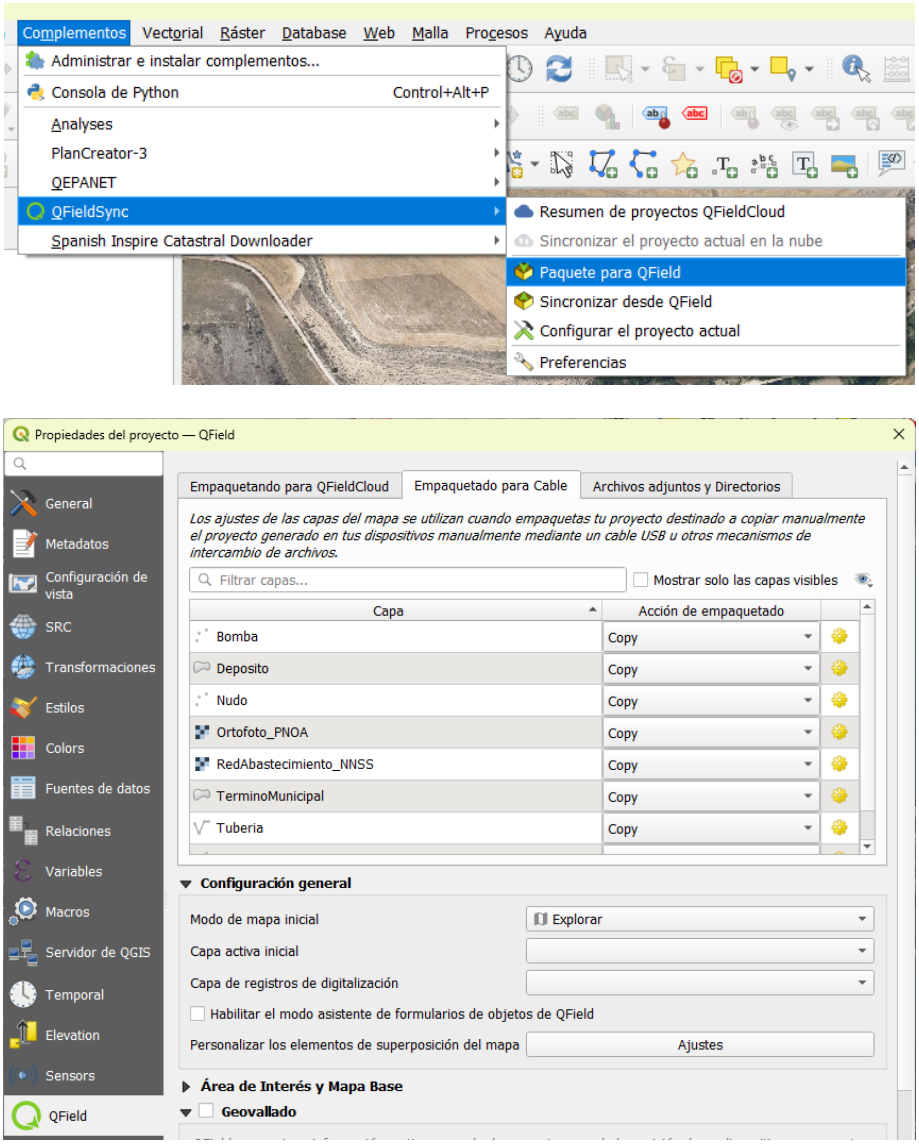
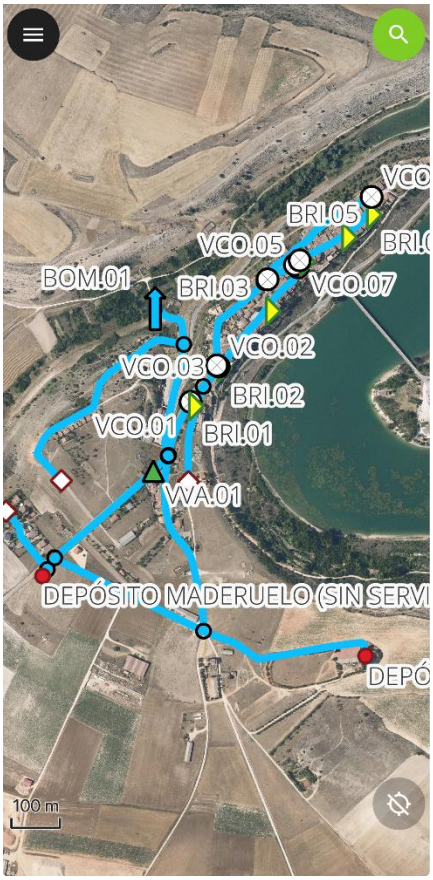
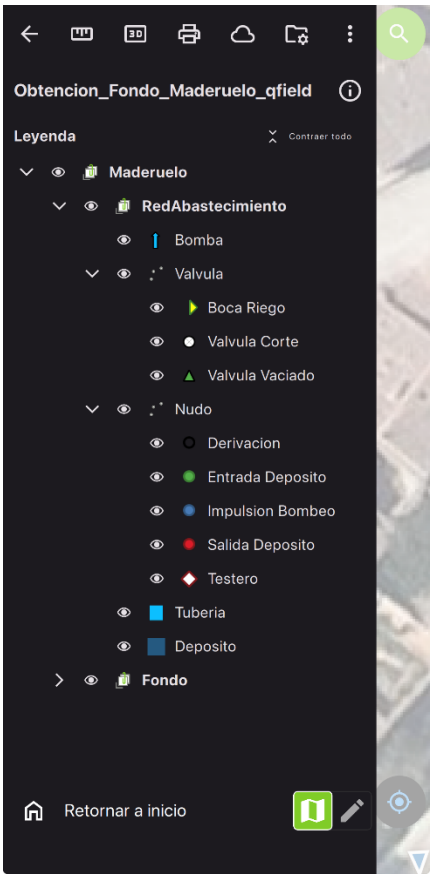


Figura 38. Configuración desde QGIS con QFieldSync para exportar a QField y visualizar en el dispositivo móvil. Elaboración propia

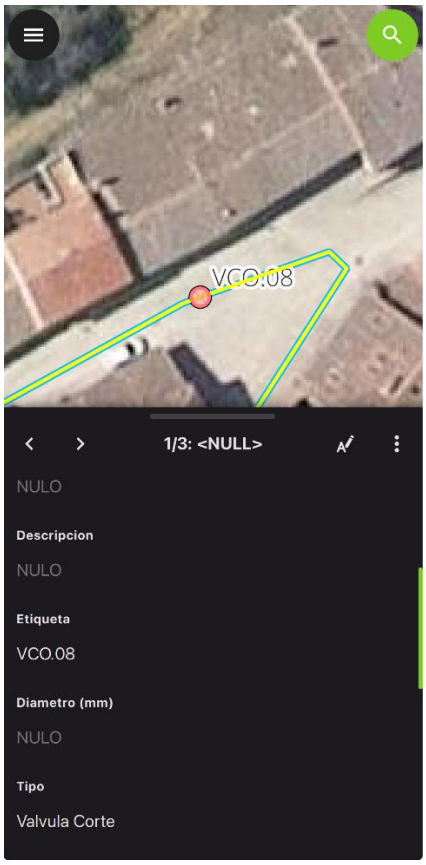
Una vez creado el directorio, se transfiere al dispositivo móvil y se puede visualizar de la misma manera que se visualiza en el ordenador. La aplicación permite, mediante una interfaz sencilla, modificar los datos geométricos o de atributos de los elementos ya representados en campo o añadir elementos.

En este caso se comprueban los elementos en campo empleando la aplicación y se confirma la ubicación y los detalles de los elementos.








VCO.08
1/3: <NULL>
NULO
Descripcion
NULO
Etiqueta
VCO.08
Diametro (mm)
NULO
Tipo
Valvula Corte

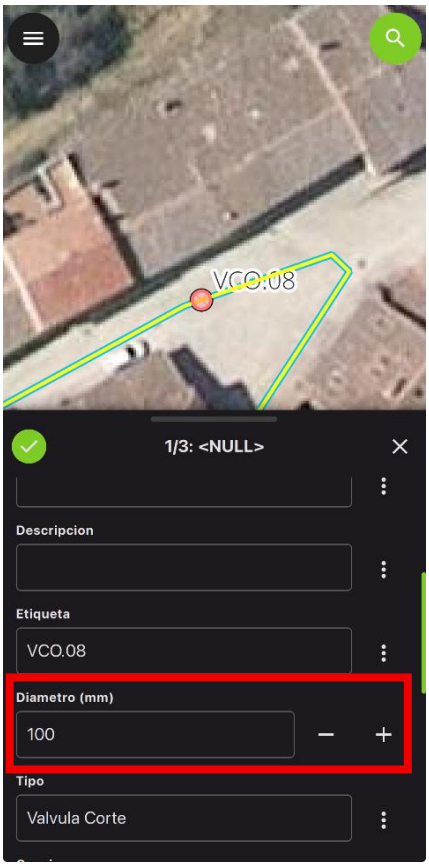

VCO.08
1/3: <NULL>
Descripcion
Etiqueta
VCO.08
Diametro (mm)
100
Tipo
Valvula Corte



Figura 39. Proceso de toma de datos en campo con dispositivo móvil a través de la aplicación QField, exportación y comprobación en gabinete con QGIS de la actualización. Elaboración propia

Una vez completados todos los datos, el modelo está disponible para ser empleado en el AIM.

6.2.2. Fase II: Definición estratégica de la metodología BIM

6.2.2.1. Requisitos de Información de la Organización (OIR)

Desde el Ayuntamiento de Maderuelo, se recogen dos metas (*las recogidas en la metodología*):

- **Sostenibilidad y Neutralidad Climática**: La necesidad de auditar y reducir la huella de carbono (Categorías 2, 3, 4, 5 y 6 ISO 14064-1:2019) de la infraestructura.

- **Optimización del servicio**: La necesidad de implementar planes de mantenimiento preventivo y predictivo que minimicen las interrupciones del servicio.

6.2.2.2. Requisitos de Información del Activo (AIR)

Una vez establecido los OIR, se procede a establecer los requisitos de los activos, fundamental para los procesos de explotación, mantenimiento e inventario de las emisiones GEI.

- **Parámetros generales**
    - ***Identificador activo***

Se establece la siguiente sintaxis para el atributo *Tag* de la entidad *IfcRoot* para la identificación del modelo que permita la interoperabilidad:

[SISTEMA].[SUBSISTEMA].[TIPO DE ELEMENTO].[ID ÚNICO]

A continuación, se detalla la propuesta de codificación para los elementos constitutivos de la red de abastecimiento municipal:

Tabla 25. Codificación de los identificadores activos de los elementos del modelo. Elaboración propia

Elemento de la Red	**Entidad OpenBIM** ***IfcEntity*** **(IFC4x3)**	**Tipo** ***PredefinedType*** **(IFC4x3)**	**Código Propuesto** ***Tag*** **(IFC4x3)**
Depósito de almacenamiento de agua potable	IfcFacility / IfcTank	NOTDEFINED	**ABA.DEP.DEP.001** *(Abastecimiento . Depósito . Depósito . 01)*
Bombeo	IfcPump	NOTDEFINED	**ABA.BOM.BOM.001** *(Abastecimiento . Bombeo . Impulsión . 01)*
Tubería	IfcPipeSegment	NOTDEFINED	**ABA.RED.TUB.105** *(Abastecimiento . Red . Tubería . Tramo 105)*
Válvula de seccionamiento (o de corte)	IfcValve	*ISOLATING*	**ABA.RED.VCO.204** *(Abastecimiento . Red . Válvula Seccionamiento . 204)*
Desagüe (Válvula de vaciado)	IfcValve	*DRAWOFF*	**ABA.RED.VVA.012** *(Abastecimiento . Red . Desagüe . 12)*
Válvula de aireación (Ventosa)	IfcValve	*AIRRELEASE*	**ABA.RED.VEN.045** *(Abastecimiento . Red . Ventosa . 45)*
Boca de riego	IfcFireTerminal	*FIREHYDRANT*	**ABA.RED.BRI.008** *(Abastecimiento . Red . Hidrante . 08)*

- **Integración de la codificación AEAS**

Los elementos hidráulicos que posean codificación en las guías de clasificación de la Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (AEAS) – AeasBIMClass.v02 tendrán que incluir dicha codificación.

La codificación se definirá en un Pset denominado AEAS_Pset_Clasification y contendrá los siguientes atributos:

Tabla 26. Codificación de los Pset para la integración de la codificación de AEAS. Elaboración propia

Property Set (Pset)	**Atributos AEAS**	**Detalle**
AEAS_Pset_Clasification	AeasFluAcr	Acrónimo del fluido
	AeasFluCod	Código del fluido
	AeasFluDes	Descripción del fluido
	AeasMatAcr	Acrónimo del material (tubería)
	AeasMatCod	Código del material (tubería)
	AeasMatDes	Descripción del material (tubería)
	AeasObjAcr	Acrónimo del objeto (elemento)
	AeasObjCod	Código del objeto (elemento)
	AeasObjDes	Descripción del objeto (elemento)

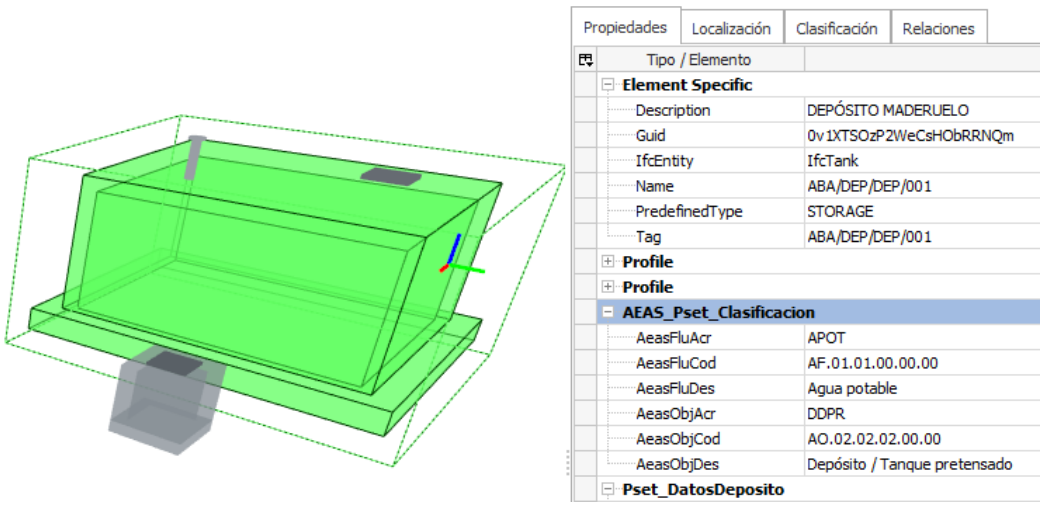


Figura 40. Captura de pantalla en la que se comprueba que la codificación del Depósito es correcta. Elaboración propia

- **Parámetros de mantenimiento y operación**

Para tener la información necesaria del activo cuando se incorpore al GMAO se han definido los siguientes conjuntos de propiedades.

Los parámetros incorporados son los referidos a válvulas y tuberías de nueva instalación, ya que tanto los elementos de la red de distribución como el depósito en servicio no dispone de manual de explotación o de mantenimiento (de ahí la incorporación de los planes de mantenimiento):

Tabla 27. Relación de parámetros de mantenimiento y operación a incluir en los modelos incorporados. Elaboración propia

Categoría de parámetros OPEX	**Property Set (Pset)**	**Atributos Obligatorios**	**Detalle atributo**
Fabricación y documentación	Pset_ManufacterTypeInformation	Manufacter	Fabricante
		ModelNumber	Modelo
		AssemblyPlace	Lugar de montaje
		DocumentReference	Guia de mantenimiento
Ciclo de vida y Garantías	Pset_LCA	InstalationDate	Fecha de instalación
		ExpectedLife	Vida útil estimada
		WarrantyStartDate	Inicio garantía
		WarrantyPeriod	Duración garantía

Para asegurar que estos parámetros sean útiles para la metodología planteada, se define las siguientes reglas de inyección de datos durante la fase de modelado:

- Los manuales de operación y mantenimiento (O&M) no deben entregarse como archivos PDF aislados. Se empleará el uso del atributo *DocumentReference* dentro del modelo IFC,

que debe apuntar mediante una URL estática al repositorio en la nube del Entorno Común de Datos (CDE). Así, el operario puede acceder al manual del activo haciendo clic sobre el modelo en el visor web.



Figura 41. Referencias a las guías de operación y mantenimiento de una válvula procedente del IFC. Elaboración propia

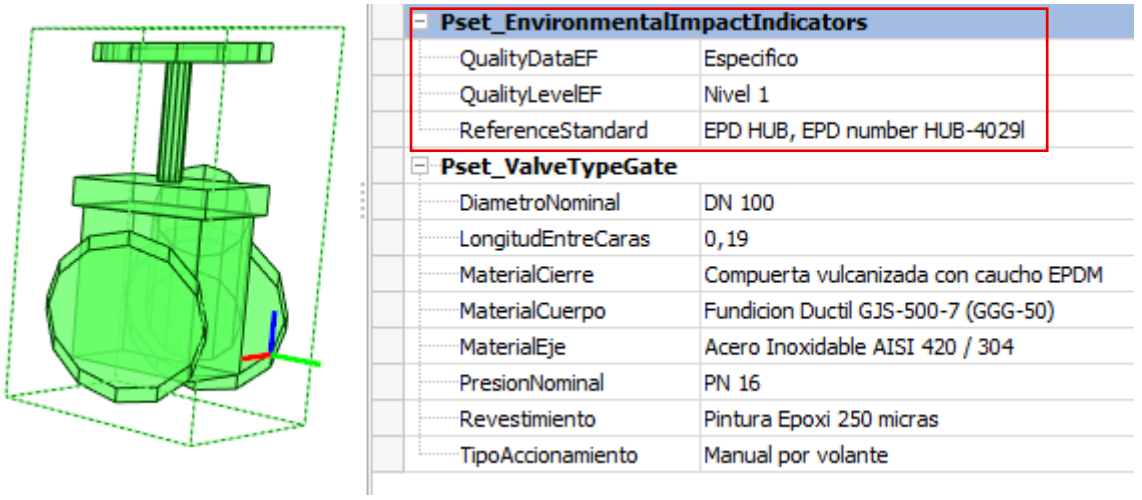
- Todos los parámetros numéricos (como presiones en bar o potencia en kW) se exportarán con sus unidades en el esquema IFC. Esto evitará fallos de lectura en las bases de datos espaciales (GeoJSON) empleadas por el visor cartográfico, garantizando que el GMAO no malinterprete datos.

- **Parámetros de sostenibilidad**

Según indica la metodología, el modelo tendrá que venir con los siguientes parámetros cumplimentados:

Tabla 28. Relación de parámetros de sostenibilidad a incluir en los modelos incorporados. Elaboración propia

Categoría de parámetros sostenibilidad	**Property Set (Pset)**	**Atributos Obligatorios**	**Detalle atributo**
Trazabilidad ambiental de materiales	Pset_EnvironmentalImpactIndicators	QualityLevelEF	Nivel 1, 2, 3 (Booleano)
		QualityDataEF	Específico / Estimado (Booleano)
		ReferenceStandard	Norma EDP




```
#238= IFCPROPERTYENUMERATION('PEnum_QualityLevelEF', (IFCLABEL('Nivel 1'), IFCLABEL('Nivel 2'), IFCLABEL('Nivel 3')), $);
#239= IFCPROPERTYENUMERATION('PEnum_QualityDataEF', (IFCLABEL('Especifico'), IFCLABEL('Estimado')), $);

#240= IFCPROPERTYENUMERATEDVALUE('QualityLevelEF', $, (IFCLABEL('Nivel 1')), #238);
#241= IFCPROPERTYENUMERATEDVALUE('QualityDataEF', $, (IFCLABEL('Especifico')), #239);
#242= IFCPROPERTYSINGLEVALUE('ReferenceStandard', $, IFCTEXT('EPD HUB, EPD number HUB-40291'), $);

#243= IFCPROPERTYSET('2L8vM4qS96bB1TcJ8RnX2y',#5,'Pset_EnvironmentalImpactIndicators',$,(#240,#241,#242));
#244= IFCRELDEFINESBYPROPERTIES('0Wc7O2sV88zE3GbN6IrL5u',#5,$,$,(#102),#243);
```

Figura 42. Comprobación de los booleanos en los campos de QualityLevelEF y QualityDataEF para no poder introducir otros valores. Elaboración propia

6.2.2.3. Requisitos de Intercambio de Información (EIR)

- **Formato de entrega e Interoperabilidad**

  - ***Estándar IFC aplicado***

Para la aplicación de la metodología objeto de la investigación, se aplicará el Estándar IFC 4, en concreto la versión **IFC 4.3.2.0.** definida en la ISO 16739-1:2024.

  - ***Datos para la transformación espacial***

Los archivos IFC contienen los campos *RefElevation*, *RefLatitud* y *RefLongitude*, completados con el sistema de coordenadas **SRC WGS84**.

- **Definición de la estructura semántica**

Guiado por la metodología propuesta, se adjunta la siguiente tabla con la estructura semántica que deben cumplir los ficheros IFC 4.0 incorporados al sistema Maderuelo.

Tabla 29. Matriz de mapeo semántico

Dato requerido	**Entidad y atributo destino**	**Tipo de dato IFC (IFC Data Type)**	**Tipo de dato BBDD**
Identificador único	IfcRoot.GlobalId	IfcGloballyUniqueId	String
Identificador Activo	IfcRoot.Tag	IfcIdentifier	String
Clasificación AEAS	IfcClassificationReference.ItemReference	IfcIdentifier	String
Fabricante	Pset_ManufacterTypeInformation.Manufacterer	IfcLabel	String
Modelo	IfcElement.Tag	IfcIdentifier	String
Fecha de instalación	Pset_InstallationOccurrence.InstallationDate	IfcDate	String

Dato requerido	Entidad y atributo destino	Tipo de dato IFC (IFC Data Type)	Tipo de dato BBDD
Vida útil estimada	Pset_MaintainableEntity.ExpectedLife	IfcTimeMeasure	Entero
Inicio Garantía	Pset_Warranty.WarrantyStartDate	IfcDate	String
Duración garantía	Pset_Warranty.WarrantyPeriod	IdfDuration	String

El resto de datos requeridos no están recogidos en el esquema IFC 4.

- **Validación mediante IDS**

Antes de incorporar los ficheros IFC a la carpeta de 02 – COMPARTIDO, el fichero IFC tendrá que ser sometido a un control de validación mediante el fichero IDS y compartir el informe obtenido junto con el fichero auditado.

El fichero IDS ha sido configurado en la metodología (Anexo 2)

Validador IDS para archivos IFC

Auditoría de requisitos IDS para IFCTANK (Clasificación AEAS) e IFCVALVE (AEAS + Fabricante + LCA + Indicadores Ambientales).

1. Definición IDS Embebida (Reglas de Validación)

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<ids:ids xmlns:ids="http://standards.buildingsmart.org/IDS"
         xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
         name="Especificacion_AEAS_Fabricante_LCA_Impacto">
  <ids:info>
    <ids:title>Validacion de Parametros AEAS, Fabricante, LCA e Impacto Ambiental</ids:title>
    <ids:version>1.3</ids:version>
    <ids:date>2026-09-11</ids:date>
  </ids:info>
  <ids:specifications>
    <!-- REGLA PARA DEPOSITOS (IFCTANK): SOLO AEAS -->
    <ids:specification name="Requisitos_Depositos" ifcVersion="IFC4">
      <ids:applicability>
        <ids:entity>
          <ids:name><ids:simpleValue>IFCTANK</ids:simpleValue></ids:name>
        </ids:entity>
      </ids:applicability>
      <ids:requirements>
        <ids:property cardinality="required">
```

2. Cargar archivo IFC

Arrastra aquí tu archivo **.ifc** o haz clic para seleccionarlo

Validar contra IDS

3. Resultados de la Auditoría

Descargar Informe en PDF

Resultado Global: 9 / 17 requisitos cumplidos (52.9%)

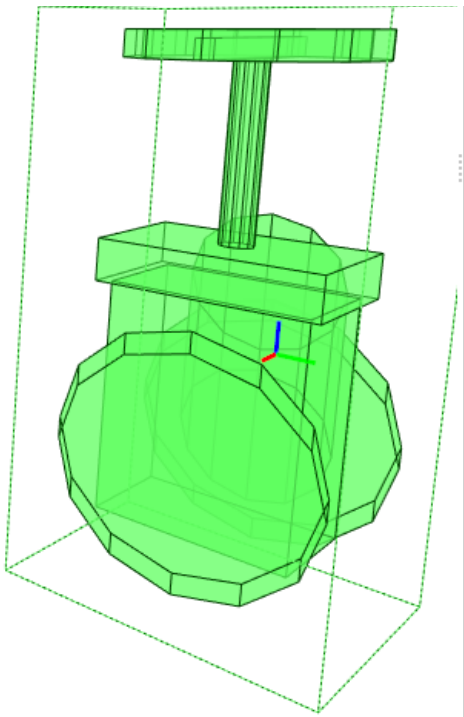
Elemento	Property Set	Parámetro Requerido	Valor Detectado	Estado	Detalle / Restricción IDS
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluAcr	ARES	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluCod	AF.01.06.00.00.00	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluDes	Agua residual	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjAcr	PPAM	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjCod	AO.01.04.05.00.00	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjDes	Pasamuros	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	Manufacter	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_ManufacterTypeInformation]
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	ModelNumber	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_ManufacterTypeInformation]

Archivo analizado: valvula_sencilla_GEI.ifc
Fecha y hora: 11/9/2026 2:53:46
Criterio: IFCTANK (AEAS) | IFCVALVE (AEAS + Fabricante + LCA + Impacto Ambiental)

Cumplimiento: 9 / 17 (52.9%)

Elemento	Property Set	Parámetro Requerido	Valor Detectado	Estado	Detalle / Restricción
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluAcr	ARES	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluCod	AF.01.06.00.00.00	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluDes	Agua residual	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjAcr	PPAM	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjCod	AO.01.04.05.00.00	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjDes	Pasamuros	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	Manufacter	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_ManufacterTypeInformation]
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	ModelNumber	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_ManufacterTypeInformation]
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	AssemblyPlace	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_ManufacterTypeInformation]
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	DocumentReference	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_ManufacterTypeInformation]
IFCVALVE (#102)	Pset_LCA	InstalationDate	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_LCA]
IFCVALVE (#102)	Pset_LCA	ExpectedLife	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_LCA]
IFCVALVE (#102)	Pset_LCA	WarrantyStartDate	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_LCA]
IFCVALVE (#102)	Pset_LCA	WarrantyPeriod	No asignado	FALLA	Falta Pset [Pset_LCA]
IFCVALVE (#102)	Pset_EnvironmentalImpactIndicators	QualityLevelEF	Nivel 1	PASA	Valor permitido (Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3)
IFCVALVE (#102)	Pset_EnvironmentalImpactIndicators	QualityDataEF	Especifico	PASA	Valor permitido (Especifico, Estimado)

Elemento	Property Set	Parámetro Requerido	Valor Detectado	Estado	Detalle / Restricción
IFCVALVE (#102)	Pset_EnvironmentalImpactIndicators	ReferenceStandard	EPD HUB, EPD number HUB-4029I	PASA	Propiedad y valor conformes



AeasFluAcr	ARES
AeasFluCod	AF.01.06.00.00.00
AeasFluDes	Agua residual
AeasMatAcr	MPEA
AeasMatCod	AM.04.03.01.00.00
AeasMatDes	PEAD (Polietileno de Alta Densidad)
AeasObjAcr	PPAM
AeasObjCod	AO.01.04.05.00.00
AeasObjDes	Pasamuros
AeasProAcr	PBEM
AeasProCod	AP.05.04.00.00.00
AeasProDes	EBAR-Entrega al medio (obra de salida)
Pset_EnvironmentalImpactIndicators	
QualityDataEF	Especifico
QualityLevelEF	Nivel 1
ReferenceStandard	EPD HUB, EPD number HUB-4029I
Pset_LCA	
ExpectedLife	1 576 800 000
InstalationDate	2026-09-15T08:00:00
WarrantyPeriod	157 680 000
WarrantyStartDate	2026-09-15
Pset_ManufacterTypeInformation	
AssemblyPlace	Planta Industrial Zaragoza
DocumentReference	https://www.avkvalvulas.com/fichas/FT-0630-DN100.pdf
Manufacter	AVK Valvulas S.A.
ModelNumber	Series 06/30 DN100 PN16

Archivo analizado: valvula_sencilla_cumpleIDS.ifc
Fecha y hora: 11/9/2026 3:03:20
Criterio: IFCTANK (AEAS) | IFCVALVE (AEAS + Fabricante + LCA + Impacto Ambiental)

Cumplimiento: 17 / 17 (100.0%)

Elemento	Property Set	Parámetro Requerido	Valor Detectado	Estado	Detalle / Restricción
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluAcr	ARES	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluCod	AF.01.06.00.00.00	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasFluDes	Agua residual	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjAcr	PPAM	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjCod	AO.01.04.05.00.00	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	AEAS_Pset_Clasificacion	AeasObjDes	Pasamuros	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	Manufacter	AVK Valvulas S.A.	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	ModelNumber	Series 06/30 DN100 PN16	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	AssemblyPlace	Planta Industrial Zaragoza	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_ManufacterTypeInformation	DocumentReference	https://www.avkvalvulas.com/fichas/FT-0630-DN100.pdf	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_LCA	InstalationDate	2026-09-15T08:00:00	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_LCA	ExpectedLife	50 anos	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_LCA	WarrantyStartDate	2026-09-15	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_LCA	WarrantyPeriod	5 anos	PASA	Propiedad y valor conformes
IFCVALVE (#102)	Pset_EnvironmentalImpactIndicators	QualityLevelEF	Nivel 1	PASA	Valor permitido (Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3)
IFCVALVE (#102)	Pset_EnvironmentalImpactIndicators	QualityDataEF	Especifico	PASA	Valor permitido (Especifico, Estimado)

Elemento	Property Set	Parámetro Requerido	Valor Detectado	Estado	Detalle / Restricción
IFCVALVE (#102)	Pset_EnvironmentalImpactIndicators	ReferenceStandard	EPD HUB, EPD number HUB-4029I	PASA	Propiedad y valor conformes

Figura 43. Comprobación de los Pset, valores y características con el fichero IDS de varios ficheros IFC. Elaboración propia

6.2.2.4. Configuración del Entorno Común de Datos (CDE)

- **Definición del CDE**

La estructura del CDE para el Ayuntamiento de Maderuelo se ha configurado para un servidor local o carpetas de red compartidas dentro de una red local, exportable a un servicio de almacenamiento en la nube (Google Drive, Microsoft OneDrive…)

- **Roles y responsabilidades**

Los actores que entrarán en contacto con el CDE serán los siguientes:

Tabla 30. Roles y responsabilidad en el CDE. Elaboración propia

Rol	**Responsabilidades**
Responsable BIM (Ingeniero gestor)	• Comunicación BIM con empresa externa. • Validación de los modelos IFC transformados a GeoJSON por parte del Coordinador BIM (Técnico Gestor) • Gestionar el flujo de información dentro del repositorio de la gestora de la red. • Gestionar e incorporar los planes de mantenimiento en el visor. • Gestionar e incorporar las emisiones GEI en el visor.
Coordinador BIM (Técnico gestor)	• Interlocutor BIM con empresa externa (datos que falten o modelos no validados) • Asegurar que los entregables BIM cumplen con el nivel de calidad exigido en el PEB propuesto por la empresa. • Garantizar la calidad de la entrega de la empresa externa en el CDE sobre los aspectos indicados en el Control de Calidad presentado por la empresa externa.
Responsable BIM (Encargado externo)	• Validación del modelado IFC realizado por el modelador BIM. • Realización de los análisis de detección de errores (ILS) y transmisión de resultados. • Gestionar los ficheros de la empresa en el CDE y ubicarlos en su lugar correspondiente. • Gestionar la transmisión de información a la empresa gestora, así como su calidad. • Asistencia a las reuniones con la empresa gestora. • Preparación de reuniones digitales, organización, invitación a los asistentes, redacción del acta de reunión, manejo de los modelos de coordinación durante las reuniones y seguimiento de los temas tratados.
Modelador BIM (Técnico externo)	• Responsable de la información y desarrollo geométrico de sus modelos, cumpliendo con los requisitos de calidad del PEB. • Primer filtrado de revisión de problemas de diseño durante la generación de los diferentes modelos. • Resolución de interferencias o errores detectados. • Búsqueda y cumplimentación de la documentación para la explotación y mantenimiento del elemento modelado. • Búsqueda y cumplimentación de la información de las emisiones GEI para vincularlas al modelo IFC.

- **Estado de los modelos**

Al igual que indica la metodología empleada, se establecen 4 estados para los modelos:

Tabla 31. Clasificación de estado de los modelos en el CDE. Elaboración propia

Estado	**Descripción**
Trabajo en progreso	Ficheros no aptos para ser compartidos
Compartido	Ficheros aptos para ser compartidos entre la empresa externa y la empresa gestora pero no para ser publicados en el visor
Publicado	Ficheros aptos para ser publicados en el visor al ser revisados por el Responsable BIM de la empresa gestora.
Archivado	Ficheros de activos que ya no se encuentran operativos en la red de distribución.

- **Estructura de carpetas**

La estructura de carpetas se conforma según la metodología propuesta de la siguiente manera:

Tabla 32. Estructura de carpetas del CDE. Elaboración propia

Nivel 1	**Nivel 2**	**Nivel 3**
Municipio o red que gestionar	00 -INFO	
	01 - GIS	01 – TRABAJO EN PROGRESO
		02- COMPARTIDO
		03- PUBLICADO
		04- ARCHIVADO
	02 - BIM	01 – TRABAJO EN PROGRESO
		02- COMPARTIDO
		03- PUBLICADO

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
		04- ARCHIVADO
	03 - GMAO	01 – TRABAJO EN PROGRESO
		02- COMPARTIDO
		03- PUBLICADO
		04- ARCHIVADO
	04 - GEI	01 – TRABAJO EN PROGRESO
		02- COMPARTIDO
		03- PUBLICADO
		04- ARCHIVADO

- **Nombrado de los ficheros**

El sistema de nombrado de documentación es el siguiente:

NOMBRE RED – TIPO DE DOCUMENTO – DISCIPLINA -Nº DOCUMENTO – DESCRIPCIÓN – ESTADO – REVISIÓN

Ejemplo:

MADERUELO-MOD-BIM-001- ABA/RED/VCO/204-AF-V02

Tabla 33. Características y reglas a cumplir para el nombrado de ficheros en el CDE. Elaboración propia

Campos	Descripción	Formato	Número de caracteres
Nombre proyecto	Código del proyecto invariable	Alfanumérico	12
Tipo de documento	Tipo de documento (modelo, plano, acta, memoria…)	Alfanumérico	3

Disciplina	Ámbito, materia o actividad al que se corresponde el documento (INF-GIS-BIM-GMA-GEI)	Alfabético	3
Número de documento	Ordinal que sirve para enumerar partes o como elemento diferenciador cuando el resto de los campos tenga valores iguales	Numérico	3
Descripción	Texto que describe el documento para facilitar el reconocimiento y la comprensión de su contenido por parte de un humano durante todo el ciclo de vida	Alfanumérico	Lo más corto posible
Estado	Define la situación, temporal o definitiva del documento	Alfanumérico	2
Revisión	Define la versión del documento que identifica, en relación con el documento al que sustituye	Alfanumérico	3

Para facilitar la selección, se adjunta en el Anexo 3 los acrónimos para los campos Tipo de documento, disciplina y estado.

- **Control de acceso a la información**

Se establecen en las siguientes tablas los niveles de permisos mínimos que se tienen que establecer y una relación con las carpetas definidas y los permisos a establecer por usuario.

Tabla 34. Permisos establecidos en el CDE

Permisos	**Descripción**
Administrador	Controles administrativos completos
Editor	Ver + descargar + publicar marcas de revisión + cargar + editar
Creador	Ver + descargar + publicar marcas de revisión + cargar
Ver	Ver + descargar

Nivel	Carpeta	Cargo	Permisos
1	MADERUELO	Responsable BIM (Ingeniero gestor)	Administrador
		Todos los integrantes	Ver
2	00 - INFO	Responsable BIM (Ingeniero gestor)	Administrador
		Responsable BIM (Encargado externo)	Administrador
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Creador
		Modelador BIM (Técnico externo)	Ver
2	01 - GIS	Responsable BIM (Ingeniero gestor)	Administrador
3	01 - TRABAJO EN CURSO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Creador
3	02 - COMPARTIDO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Ver
3	03- PUBLICADO	Responsable BIM (Encargado externo)	Ver
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Ver
3	04- ARCHIVADO	Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
2	02 - BIM	Responsable BIM (Ingeniero gestor)	Administrador
3	01 - TRABAJO EN CURSO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Creador
3	02 - COMPARTIDO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Ver

3	03- PUBLICADO	Responsable BIM (Encargado externo)	Ver
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Ver
3	04- ARCHIVADO	Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
2	03 - GMAO	Responsable BIM (Ingeniero gestor)	Administrador
3	01 - TRABAJO EN CURSO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Creador
3	02 - COMPARTIDO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Ver
3	03- PUBLICADO	Coordinador BIM (Técnico gestor)	Ver
3	04- ARCHIVADO	Coordinador BIM (Técnico gestor)	Ver
2	04 - GEI	Responsable BIM (Ingeniero gestor)	Administrador
3	01 - TRABAJO EN CURSO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Creador
3	02 - COMPARTIDO	Responsable BIM (Encargado externo)	Editor
		Coordinador BIM (Técnico gestor)	Editor
		Modelador BIM (Técnico externo)	Ver
3	03- PUBLICADO	Coordinador BIM (Técnico gestor)	Ver
3	04- ARCHIVADO	Coordinador BIM (Técnico gestor)	Ver

6.2.3. Fase III: Incorporación y establecimiento de los planes de mantenimiento de los activos

6.2.3.1. Identificación de los elementos existentes en la red

La red de distribución a gestionar de Maderuelo abarca desde los depósitos de almacenamiento de agua potable hasta la red de tuberías y elementos que la componen. No se ha tenido en cuenta el bombeo existe ya que queda fuera del ámbito de investigación.

Por lo tanto, los elementos a incorporar en el GMAO son los siguientes:

Tabla 35. Características de la red de distribución de Maderuelo a probar. Elaboración propia

Infraestructura	**Número de elementos**
Depósito para el almacenamiento de agua potable	2 (1 fuera de servicio)
Tuberías de distribución	3962 m
Válvulas	15
Válvula de corte (o seccionamiento)	*8*
Válvula de vaciado (o desagüe)	*1*
Bocas de riego	*6*

6.2.3.2. Definición y establecimiento de los planes de mantenimiento por elementos

Identificados la tipología de los elementos de la red de distribución, se procede a confeccionar los planes de mantenimiento según la documentación consultada en el desarrollo de la metodología que se está aplicando.

Para definir tanto las operaciones como los recursos empleados, a continuación, se adjunta una tabla con los distintos planes de mantenimiento confeccionados para este proyecto de investigación.

Elemento	Depósito	**Tipo de elemento**	Depósito
Plan de mantenimiento	Periódico	**Frecuencia**	Cada 1 mes

Tareas	**Recursos empleados**	
Estructura exterior: comprobación de fisuración, formación de hielo, corrosión, envejecimiento de los materiales de sellado, aspecto de los paramentos exteriores.	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	3 s/m² inspeccionado
	Medios auxiliares	0
Interior del vaso o vasos: presencia de sedimentos o escombros.	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	30 s/nº vasos depósito
	Medios auxiliares	0
Elementos de cierre: comprobar el buen estado de puertas de acceso, tapas, ventanas, mallas de protección de insectos…	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	10 s/nº elementos
	Medios auxiliares	0
Valvulería: maniobra de las válvulas de seccionamiento y comprobación de estanqueidad (ver si suenan), comprobación del funcionamiento de las ventosas, comprobación de la correcta apertura y cierre de la válvula de llenado…	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	45 s/nº elementos
	Medios auxiliares	0
Conducciones: detectar posibles fugas visualmente y estado de corrosión tanto de la tubería como de las soldaduras realizadas	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	3 s/m inspeccionado
	Medios auxiliares	0
Instalaciones auxiliares: buen estado de escaleras, plataformas, alumbrado, equipos eléctricos, instrumentos de medida, medios de transmisión de la información.	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	10 s/nº elementos
	Medios auxiliares	0

** El desplazamiento serán los kilómetros (km) de distancia entre el centro de trabajo y la ubicación del Depósito*

Elemento	Depósito	**Tipo de elemento**	Depósito
Plan de mantenimiento	Detallada	**Frecuencia**	Cada 3 años

Tareas	**Recursos empleados**	
Vaciado del depósito	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	45 s/nº elemento maniobrado
	Medios auxiliares	m³ de agua desagüada
Estructura interior: comprobación de fisuración, corrosión, envejecimiento de los materiales de sellado, aspecto de los paramentos interiores, formación de acumulaciones de agua en solera	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	10 s/m² inspeccionado
	Medios auxiliares	0
Limpieza del depósito: eliminación de las sedimentaciones e incrustaciones con agua a presión, rastrillado y barrido.	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	60 s/m² limpiado
	Medios auxiliares	Hidrolimpiadora: 6 l/s 0,36 m³/m² limpiado
Desinfección del depósito con productos adecuados (200 mg Hipoclorito sódico por 1 l agua)	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	15 s/m² limpiado
	Medios auxiliares	Sulfatadora: 0,05 l/s 0,006 m³ agua/m² limpiado 0,001 m³ NaClO/m² limpiado
Llenado de depósito	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	45 s/nº elemento maniobrado
	Medios auxiliares	0

Elemento	Depósito	**Tipo de elemento**	Depósito
Plan de mantenimiento	Extraordinaria	**Frecuencia**	Según incidencia o trabajo programado

Tareas	**Recursos empleados**	
Vaciado del depósito	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	45 s/nº elemento maniobrado
	Medios auxiliares	m³ de agua desagüada
Reparación de impermeabilización interior del vaso	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	735 s/m² reparación
	Medios auxiliares	1,30 kg producto/m² reparación
Limpieza del depósito: eliminación de las sedimentaciones e incrustaciones con agua a presión, rastrillado y barrido.	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	60 s/m² limpiado
	Medios auxiliares	Hidrolimpiadora: 6 l/s 0,36 m³/m² limpiado
Desinfección del depósito con productos adecuados (200 mg Hipoclorito sódico por 1 l agua)	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	15 s/m² limpiado
	Medios auxiliares	Sulfatadora: 0,05 l/s 0,006 m³ agua/m² limpiado 0,001 m³ NaClO/m² limpiado
Llenado de depósito	Desplazamiento	km CT-Depósito
	Mano de obra	45 s/nº elemento maniobrado
	Medios auxiliares	0

Elemento	Tuberías	**Tipo de elemento**	Tubería
Plan de mantenimiento	Periódico	**Frecuencia**	Cada 6 meses

Tareas	**Recursos empleados**	
Inspección visual del trazado: detectar fugas de agua visibles, estado correcto del firme o calzada, deterioro de tapas metálicas, invasión o ocupación de la traza por donde discurre la tubería, obras próximas.	Desplazamiento	km red tuberías
	Mano de obra	0,40 s/m inspeccionado (10 km/h en vehículo)
	Medios auxiliares	0

Elemento	Tuberías	**Tipo de elemento**	Tubería
Plan de mantenimiento	Detallada	**Frecuencia**	Cada 2 años

Tareas	**Recursos empleados**	
Localización de fugas mediante técnicas no invasivas (geófono o correladores)	Desplazamiento	km red tuberías
	Mano de obra	3 s/m inspeccionado
	Medios auxiliares	0

Elemento	Tuberías	**Tipo de elemento**	Tubería
Plan de mantenimiento	Extraordinaria	**Frecuencia**	Según incidencia o trabajo programado

Tareas	**Recursos empleados**	
Inspección y valoración de la avería	Desplazamiento	km CT-avería
	Mano de obra	600 s/avería
	Medios auxiliares	0
Apertura de zanja y descubrir tubería	Desplazamiento	Retrocargadora: km CT-avería Camión 8 t: km CT-avería
	Mano de obra	205 s/m³ excavado
	Medios auxiliares	Retrocargadora: 432 s/m³
Sustitución de tubería	Desplazamiento	km CT-avería Retrocargadora: 0 * Camión 8 t: 0 *
	Mano de obra	5400 s/avería
	Medios auxiliares	Retrocargadora: 900 s/avería
Tapado, hormigonado de zanja	Desplazamiento	Retrocargadora: 0 * Camión 8 t: 0 *
	Mano de obra	205 s/m³ excavado
	Medios auxiliares	Retrocargadora: 432 s/m³ Hormigón: 1,05 m³/m² a hormigonar

** Se considera que ya se encuentran en el tajo por lo que no hay desplazamiento*

Elemento	Válvula	**Tipo de elemento**	Válvula de seccionamiento
Plan de mantenimiento	Periódico	**Frecuencia**	Cada 5 años

Tareas	**Recursos empleados**	
Maniobrabilidad y par de apriete, conteo de vueltas de cierre/apertura, estanqueidad del eje / prensaestopas, estado de la cabeza de accionamiento	Desplazamiento	km media entre elementos de la red
	Mano de obra	120 s/ elemento
	Medios auxiliares	0
Revisar tapa de registro y marco (nivelación con el firme, ausencia de ruidos o roturas en la tapa metálica), estado interior del pozo o arqueta (comprobar ausencia de sedimentación excesiva o si se inunda el registro)	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	30 s/elemento
	Medios auxiliares	0

Elemento	Válvula	**Tipo de elemento**	Desagüe / Boca riego
Plan de mantenimiento	Periódico	**Frecuencia**	Cada 5 años

Tareas	**Recursos empleados**	
Maniobrabilidad del mecanismo, capacidad de desagüe y turbidez y estanqueidad tras el cierre	Desplazamiento	km media entre elementos de la red
	Mano de obra	120 s/ elemento
	Medios auxiliares	0
Revisar tapa de registro y marco (nivelación con el firme, ausencia de ruidos o roturas en la tapa metálica), estado interior del pozo o arqueta (comprobar ausencia de sedimentación excesiva o si se inunda el registro)	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	30 s/elemento
	Medios auxiliares	0

Elemento	Válvula	**Tipo de elemento**	Válvula de seccionamiento
Plan de mantenimiento	Detallada	**Frecuencia**	Cada 20 años

Tareas	**Recursos empleados**	
Realizar corte de suministro y vaciado de tubería	Desplazamiento	5 x km media entre elementos de la red
	Mano de obra	700 s/ elemento
	Medios auxiliares	0
Desmontaje de la válvula, comprobación de estado, sustitución de tornillería y junta EDPM, montaje de la válvula	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	2700 s/elemento
	Medios auxiliares	3 kg acero inox/elemento 0,50 kg EDPM

Elemento	Válvula	**Tipo de elemento**	Desagüe / Boca riego
Plan de mantenimiento	Detallada	**Frecuencia**	Cada 20 años

Tareas	**Recursos empleados**	
Realizar corte de suministro y vaciado de tubería	Desplazamiento	5 x km media entre elementos de la red
	Mano de obra	700 s/ elemento
	Medios auxiliares	0
Desmontaje de la válvula, comprobación de estado, sustitución de tornillería y junta EDPM, montaje de la válvula	Desplazamiento	0 *
	Mano de obra	1350 s/elemento
	Medios auxiliares	1,5 kg acero inox/elemento 0,25 kg EDPM

Elemento	Válvula	**Tipo de elemento**	Válvula de seccionamiento
Plan de mantenimiento	Extraordinaria	**Frecuencia**	Según incidencia o trabajo programado

Tareas	**Recursos empleados**	
Inspección y valoración de la avería	Desplazamiento	km CT-avería
	Mano de obra	600 s/avería
	Medios auxiliares	0
Vaciado de registro y corte de suministro	Desplazamiento	5 x km media entre elementos de la red
	Mano de obra	700 s/ elemento
	Medios auxiliares	Bomba de achique: 5 l/s Registro: 2 m3 400 s bomba achique/elemento
Sustitución de válvula	Desplazamiento	0
	Mano de obra	2700 s/elemento
	Medios auxiliares	Válvula 1,5 kg acero inox/elemento 0,50 kg EDPM

** Se considera que ya se encuentran en el tajo por lo que no hay desplazamiento*

Elemento	Válvula	**Tipo de elemento**	Desagüe / Boca riego
Plan de mantenimiento	Extraordinaria	**Frecuencia**	Según incidencia o trabajo programado

Tareas	**Recursos empleados**	
Inspección y valoración de la avería	Desplazamiento	km CT-avería
	Mano de obra	600 s/avería
	Medios auxiliares	0
Vaciado de registro y corte de suministro	Desplazamiento	5 x km media entre elementos de la red
	Mano de obra	700 s/elemento
	Medios auxiliares	Bomba de achique: 5 l/s Registro: 2 m3 400 s bomba achique/elemento
Sustitución de válvula	Desplazamiento	0
	Mano de obra	1350 s/elemento
	Medios auxiliares	Válvula 1,5 kg acero inox/elemento 0,50 kg EDPM

6.2.4. Fase IV: Incorporación y establecimiento del inventario de emisiones de GEI en las operaciones de los planes de mantenimiento

6.2.4.1. Definición de los límites organizacionales y operacionales

- **Límite organizacional**

Dado que la metodología y la investigación desarrollada trata sobre la red de abastecimiento del municipio de Maderuelo y que el Ayuntamiento es el gestor de la misma, se define el Ayuntamiento como la entidad gestora responsable del 100% de las operaciones de mantenimiento y control.

Por lo tanto, los límites de la organización son de **Control**.

- **Límite operacional**

Dado que la actividad objeto de la investigación es el mantenimiento y explotación de una red de distribución de agua, la actividad está acotada dentro del ciclo integral del agua de la siguiente manera:

- Almacenamiento de agua en Depósito destinado para agua de consumo.

- Distribución del agua a través de una red de válvulas y elementos de control (válvulas).

6.2.4.2. Inventario de emisiones

- **Inventario de equipos móviles y maquinaria en las tareas de los planes de mantenimiento**

Una vez analizadas todas las actividades, se ofrece a continuación el inventario de los consumos de combustibles asociados a cada uno de los elementos necesarios para desarrollar las actividades recogidas en los PM.

Tabla 36. Inventario de equipos móviles, maquinaria. Consumos y combustibles empleados. Elaboración propia

Uso	Equipo	Detalles	Combustibles consumidos				
			Gasolina 95	**GLP**	**Aceite SAE10W40**	**Gasoil**	**Electricidad**
Transporte de personal	Furgoneta ECO	Furgoneta Gasolina+GLP 1.6 80 kW (110CV)	3,31 kg/100 km	2,10 kg/ 100 km	-	-	-
Maquinaria	Retrocargadora	Retrocargadora 81 kW (109 CV)	-	-	-	12 l/h	-
	Camión	Camión pesado de 8 t	-	-	-	35 l/100 km	-
	Generador eléctrico	Generador gasolina 7,0 kW - 420 CC	3,00 l/h	-	0,22 l/h	-	-
	Hidrolimpiadora	Hidrolimpiadora eléctrica 1,6 kW 120 bares de presión	-	-	-	-	1,6 kW/h
	Bomba de achique	Bomba autoaspirante eléctrica alta presión, de 1,1 kW, para un caudal de 18 m3/h	-	-	-	-	1,1 kW/h

- **Emisiones GEI de los combustibles empleados en los equipos móviles y maquinarias inventariados**

Una vez identificados los combustibles empleados para las distintas actividades de los planes de mantenimiento, se determinan la tipología de los gases de los combustibles empleados.

Tabla 37. Tipología de emisiones GEI por tipo de combustible. Elaboración propia

Combustible	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**	**HFCs**	**PFCs**	**SF_6**	**NF_3**
Gasolina 95	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No
GLP	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No
Aceite SAE10W-40 (Combustión)	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No
Gasóleo (Diésel A / B / C)	Sí	Sí	Sí	No	No	No	No

Identificados los gases emitidos por cada combustible, se procede al cálculo de cada uno de ellos. En primer lugar, se obtiene las emisiones de los GEI a través del producto entre el poder calorífico del combustible y el factor de emisión de cada uno de los GEI. Para determinar dichos parámetros se recurre al Anexo V del Informe de Inventarios GEI 1990-2024 (Edición 2026) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Tabla 38. Obtención de la cantidad de emisiones GEI por tipo de gas y combustible. Elaboración propia

Combustible	**PCI (GJ/t)**	**Factor de emisión (kg GEI/GJ PCI)**			**Emisiones por kg (kg)**		
		CO_2	**CH_4 ***	**N_2O ***	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**
Gasolina 95 *	44,30	69,30	0,003	0,0006	3,07	0,00013	0,00003
GLP	47,30	63,10	0,001	0,0001	2,98	0,00005	0,00001
Gasóleo	43,00	74,10	0,003	0,0006	3,19	0,00013	0,00003

** Valores obtenidos del Sexto Informe de Evaluación IPCC AR6*

Para el cálculo de los kg de GEI del aceite SAE 10W-40 se determina de la misma manera que los otros combustibles excepto el CO_2, el cual se calcula con el producto del poder calorífico del lubricante por el contenido de carbono y el factor de conversión entre el carbono y la masa de dióxido de carbono:

Tabla 39. Obtención de la cantidad de emisiones GEI por tipo de gas y aceite. Elaboración propia

Combustible	PCI (GJ/t)	Factor conver. C/CO_2	Factor de emisión (kg GEI/GJ PCI)			Emisiones por kg (kg)		
			CO_2	CH_4 *	N_2O *	CO_2	CH_4	N_2O
Aceite SAE10W-40	40,20	44/12	20	0,003	0,0006	2,95	0,00012	0,00002

- **Inventario de materiales en las tareas de los planes de mantenimiento**

A continuación se ofrece una lista con los materiales empleados en las distintas operaciones de los planes de mantenimiento establecidos:

Tabla 40. Unidades declaradas de los materiales. Elaboración propia

Materia prima / Material	Unidades PM	Equivalencia
Hormigón en masa HM-20	1 m^3	≈ 2300 kg
Agua potabilizada	1 m^3	1000 kg
Acero inoxidable AISI 304	1 kg	1 kg
Hipoclorito sódico 15%	1 kg	0,82 l
Pintura impermeabilizante epoxi/acrílica	1 kg	1 kg
Lámina EPDM 1,2 mm	1 m^2	1,5 kg
Tubería de fundición dúctil DN100 C40/C50	1 m	15,5 kg
Válvula de seccionamiento FD DN 100 PN16	1 ud	19 kg

- **Emisiones GEI de los materiales inventariados**

Para inventariar las emisiones GEI de los materiales empleados es necesario determinar que fases de la etapa el ciclo de vida del material se aplica a cada material según la UNE-EN 15804:2012+A2:2020.

Tabla 41. Identificación de los módulos que declarar en función del material. Elaboración propia

Material	**DAP a aplicar**	**Módulos que declarar**	**Justificación**
Hormigón en masa HM-20	Cuna a puerta	A1-A3	Se integra con otros materiales y no se puede separar
Agua potabilizada	Cuna a puerta	A1-A3	Sus propiedades químicas son transformadas
Acero inoxidable AISI 304	Cuna a puerta con los módulos C1-C4 y D	A1-A3, C, D	Cumple todos los requisitos 5.2.
Hipoclorito sódico 15%	Cuna a puerta	A1-A3	El producto no se puede identificar en el fin de vida
Pintura impermeabilizante epoxi/acrílica	Cuna a puerta	A1-A3	Se integra con otros materiales y no se puede separar
Lámina EPDM 1,2 mm	Cuna a puerta con los módulos C1-C4 y D	A1-A3, C, D	Cumple todos los requisitos 5.2.
Tubería de fundición dúctil DN100 C40/C50	Cuna a puerta con los módulos C1-C4 y D	A1-A3, C, D	Cumple todos los requisitos 5.2.
Válvula de seccionamiento FD DN 100 PN16	Cuna a puerta con los módulos C1-C4 y D	A1-A3, C, D	Cumple todos los requisitos 5.2.

Una vez determinadas los módulos a considerar en las emisiones GEI, se procede a la búsqueda de información (ya que no se dispone de información previa de los materiales empleados por el Ayuntamiento de Maderuelo y la empresa de mantenimiento).

En la siguiente tabla se indican los materiales empelados, la fuente de datos, la calidad de la fuente de datos (según la Tabla E.2 del Anexo E de la UNE-EN 15804:2012+A2:2020), los módulos y el potencial de calentamiento global (GWP):

Tabla 42. Relación de materiales, fuente de datos, calidad de la fuente, módulos aplicados y GWP. Elaboración propia

Material	Unidad declarada	Fuente de datos	Calidad de la fuente de datos *(media entre las 3 representatividades)*	Módulos	GWP (kg CO_2 eq)
Hormigón en masa HM-20	1 m^3	GlobalEPD EN 16757-003 rev2	Bueno	A1	2,14E+02
				A2	7,22E+00
				A3	2,61E+00
				A1-A3	2,24E+02
Agua potabilizada	1 m^3	Ecoinvent v3.8 (tap water production, conventional)	Muy pobre	A1	6,80E-02
				A2	1,12E-02
				A3	3,00E-01
				A1-A3	3,80E-01
Acero inoxidable AISI 304	1 kg	EPD HUB, HUB-2434	Bueno	A1	3,47E+00
				A2	2,70E-01
				A3	-1,85E-01
				A1-A3	3,56E+00
				C1	2,61E-03
				C2	8,73E-03
				C3	2,30E-03
				C4	1,11E-04
				D	-1,68E+00
Hipoclorito sódico 15%	1 kg	Euro Chlor 2022 Eco-profile	Medio	A1	-
				A2	-
				A3	-
				A1-A3	7,40E-01

Material	Unidad declarada	Fuente de datos	Calidad de la fuente de datos *(media entre las 3 representatividades)*	Módulos	GWP (kg CO_2 eq)
Pintura impermeabilizante epoxi/acrílica	1 kg	EPD HUB, HUB-6869	Bueno	A1	2,05E-01
				A2	1,35E-02
				A3	2,94E-01
				A1-A3	5,12E-01
Lámina EPDM 1,2 mm	1 kg	EPD HUB, HUB-5805	Bueno	A1	3,21E+00
				A2	6,47E-03
				A3	1,57E-01
				A1-A3	3,37E+00
				C1	0,00E+00
				C2	5,39E-03
				C3	0,00E+00
				C4	9,22E-02
				D	-3,89E-02
Tubería de fundición dúctil DN100 C40/C50	1000 kg	EPD-IES-0012013	Medio	A1	-
				A2	-
				A3	-
				A1-A3	2,44E+03
				C1	3,40E+00
				C2	5,20E+01
				C3	5,84E+00
				C4	1,33E+00

Material	Unidad declarada	Fuente de datos	Calidad de la fuente de datos *(media entre las 3 representatividades)*	Módulos	GWP (kg CO_2 eq)
				D	-2,47E+01
Válvula de seccionamiento FD DN 100 PN16	1 kg	EPD HUB, EPD number HUB-4029	Bueno	A1	2,10E+00
				A2	2,25E-01
				A3	7,24E-03
				A1-A3	2,33E+00
				C1	2,44E-03
				C2	2,16E-03
				C3	2,13E-02
				C4	5,69E-03
				D	-1.63E+00

- **Clasificación de las emisiones según las operaciones del plan de mantenimiento**

Una vez identificados los módulos se realiza la matriz de clasificación por categorías según las directrices del Anexo F de la norma UNE-EN 14064-1:2019. Esta matriz nos permite identificar las emisiones de los distintos módulos o tipología de GEI y asociarlo a la categoría.

En el caso de las Emisiones directas, se ha tenido que dividir en dos ya que existen en las operaciones de mantenimiento y de reparación de averías emisiones móviles (ir de un sitio a otro) y emisiones estacionarias (tener un equipo en continuo trabajando en un mismo punto, como puede ser un grupo electrógeno o una retrocargadora)

A continuación se comparte la matriz:

Tabla 43. Matriz de intercambio entre módulos y gases emitidos con categorías del Anexo F de la norma UNE EN 14064-1:2019. Elaboración propia

Tipo de Elemento	Código PM	Plan de Mantenimiento	Emisiones directas						Emisiones indirectas								
			CO2	CH4	N2O	CO2_	CH4_	N2O_	A1	A2	A3	A1-A3	C1	C2	C3	C4	D
Depósito	1.1	Periódico	1.2	1.2	1.2												
Depósito	1.1	Periódico															
Depósito	1.1	Periódico															
Depósito	1.1	Periódico															
Depósito	1.1	Periódico															
Depósito	1.1	Periódico															
Depósito	1.2	Detallada	1.2	1.2	1.2				4.1	4.1	4.1	4.1					
Depósito	1.2	Detallada															
Depósito	1.2	Detallada	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	4.1	4.1	4.1	4.1					
Depósito	1.2	Detallada	1.2	1.2	1.2				4.1	4.1	4.1	4.1					
Depósito	1.2	Detallada	1.2	1.2	1.2												
Depósito	1.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2				4.1	4.1	4.1	4.1					
Depósito	1.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2				4.1	4.1	4.1	4.1					
Depósito	1.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	4.1	4.1	4.1	4.1					
Depósito	1.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2				4.1	4.1	4.1	4.1					
Depósito	1.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2												
Tubería	2.1	Periódico	1.2	1.2	1.2												
Tubería	2.2	Detallada	1.2	1.2	1.2												
Tubería	2.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2												
Tubería	2.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1									
Tubería	2.3	Extraordinaria				1.1	1.1	1.1									
Tubería	2.3	Extraordinaria					1.1	1.1	4.1	4.1	4.1	4.1					

Tipo de Elemento	Código PM	Plan de Mantenimiento	Emisiones directas						Emisiones indirectas								
			CO2	CH4	N2O	CO2_	CH4_	N2O_	A1	A2	A3	A1-A3	C1	C2	C3	C4	D
Válvula sec.	3.1.1	Periódico	1.2	1.2	1.2												
Válvula sec.	3.1.1	Periódico															
Desagüe / BR	3.2.1	Periódico	1.2	1.2	1.2												
Desagüe / BR	3.2.1	Periódico															
Válvula sec.	3.1.2	Detallada	1.2	1.2	1.2												
Válvula sec.	3.1.2	Detallada							4.1	4.1	4.1	4.1	4.3	3.2	4.3	4.3	D
Desagüe / BR	3.2.2	Detallada	1.2	1.2	1.2												
Desagüe / BR	3.2.2	Detallada							4.1	4.1	4.1	4.1	4.3	3.2	4.3	4.3	D
Válvula sec.	3.1.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2												
Válvula sec.	3.1.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1									
Válvula sec.	3.1.3	Extraordinaria							4.1	4.1	4.1	4.1	4.3	3.2	4.3	4.3	D
Desagüe / BR	3.2.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2												
Desagüe / BR	3.2.3	Extraordinaria	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1									
Desagüe / BR	3.2.3	Extraordinaria							4.1	4.1	4.1	4.1	4.3	3.2	4.3	4.3	D

- **Determinación de las emisiones por planes de mantenimiento**

Ubicadas las transformaciones para la clasificación se pueden determinar las emisiones para el informe del Anexo F. Para probar el modelo, dado que las fichas de mantenimiento se han elaborado paramétricamente (con vistas a automatizar en el visor) se van a tomar unos datos de referencia de la red de distribución de Maderuelo para calibrar el modelo.

Los datos de referencia son:

- km CT-Depósito: 0,75 (Ayuntamiento) / 20 (Empresa reparación)
- m3 vaciado depósito: 88,20
- m2 limpieza: 359,91
- m2 reparación depósito: 3
- km CT-Tubería: 0,45 (Ayuntamiento) / 20 (Empresa reparación)
- m3 excavación reparación: 5,625
- m2 excavación reparación: 3,00
- km CT-válvula: 0,326 (Ayuntamiento) / 20 (Empresa reparación)

Tipo de Elemento	Código PM	Plan de Mantenimiento	Emisiones directas														
			1.1_GWP	1.1_CO2	1.1_CH4	1.1_N2O	1.2_GWP	1.2_CO2	1.2_CH4	1.2_N2O	1.3	1.4	1.5	1_CO2EQ_GWP	1_CO2EQ_CO2	1_CO2EQ_CH4	1_CO2EQ_N2O
Depósito	1.1.1	Periódico					1,23E-01	1,23E-01	4,01E-06	9,02E-07				1,24E-01	1,23E-01	1,20E-04	2,39E-04
Depósito	1.1.2	Periódico															
Depósito	1.1.3	Periódico															
Depósito	1.1.4	Periódico															
Depósito	1.1.5	Periódico															
Depósito	1.1.6	Periódico															
Depósito	1.2.1	Detallada					1,23E-01	1,23E-01	4,01E-06	9,02E-07				1,24E-01	1,23E-01	1,20E-04	2,39E-04
Depósito	1.2.2	Detallada															
Depósito	1.2.3	Detallada	4,32E+01	4,32E+01	8,10E-04	1,57E-04	3,28E+00	3,28E+00	1,07E-04	2,41E-05				4,66E+01	4,65E+01	2,75E-02	4,80E-02
Depósito	1.2.4	Detallada					3,28E+00	3,28E+00	1,07E-04	2,41E-05				3,29E+00	3,28E+00	3,21E-03	6,38E-03
Depósito	1.2.5	Detallada					1,23E-01	1,23E-01	4,01E-06	9,02E-07				1,24E-01	1,23E-01	1,20E-04	2,39E-04
Depósito	1.3.1	Extraordinaria					1,23E-01	1,23E-01	4,01E-06	9,02E-07				1,24E-01	1,23E-01	1,20E-04	2,39E-04
Depósito	1.3.2	Extraordinaria					3,28E+00	3,28E+00	1,07E-04	2,41E-05				3,29E+00	3,28E+00	3,21E-03	6,38E-03
Depósito	1.3.3	Extraordinaria	4,32E+01	4,32E+01	8,10E-04	1,57E-04	3,28E+00	3,28E+00	1,07E-04	2,41E-05				4,66E+01	4,65E+01	2,75E-02	4,80E-02
Depósito	1.3.4	Extraordinaria					3,28E+00	3,28E+00	1,07E-04	2,41E-05				3,29E+00	3,28E+00	3,21E-03	6,38E-03
Depósito	1.3.5	Extraordinaria					1,23E-01	1,23E-01	4,01E-06	9,02E-07				1,24E-01	1,23E-01	1,20E-04	2,39E-04

Tipo de Elemento	Código PM	Plan de Mantenimiento	Emisiones directas														
			1.1_GWP	1.1_CO2	1.1_CH4	1.1_N2O	1.2_GWP	1.2_CO2	1.2_CH4	1.2_N2O	1.3	1.4	1.5	1_CO2EQ_GWP	1_CO2EQ_CO2	1_CO2EQ_CH4	1_CO2EQ_N2O
Tubería	2.1.1	Periódico					6,51E-01	6,51E-01	2,12E-05	4,77E-06				6,52E-01	6,51E-01	6,36E-04	1,26E-03
Tubería	2.2.1	Detallada					6,51E-01	6,51E-01	2,12E-05	4,77E-06				6,52E-01	6,51E-01	6,36E-04	1,26E-03
Tubería	2.3.1	Extraordinaria					3,28E+00	3,28E+00	1,07E-04	2,41E-05				3,29E+00	3,28E+00	3,21E-03	6,38E-03
Tubería	2.3.2	Extraordinaria	3,92E+01	3,92E+01	1,60E-03	3,69E-04	2,23E+01	2,23E+01	9,10E-04	2,10E-04				6,18E+01	6,16E+01	7,53E-02	1,53E-01
Tubería	2.3.3	Extraordinaria	9,57E+00	9,57E+00	3,90E-04	9,00E-05								9,61E+00	9,57E+00	1,17E-02	2,39E-02
Tubería	2.3.4	Extraordinaria	2,58E+01	2,58E+01	1,05E-03	2,43E-04								2,59E+01	2,58E+01	3,16E-02	6,44E-02
Válvula sec.	3.1.1.1	Periódico					5,35E-02	5,35E-02	1,75E-06	3,92E-07				5,37E-02	5,35E-02	5,24E-05	1,04E-04
Válvula sec.	3.1.1.2	Periódico															
Desagüe / BR	3.2.1.1	Periódico					5,35E-02	5,35E-02	1,75E-06	3,92E-07				5,37E-02	5,35E-02	5,24E-05	1,04E-04
Desagüe / BR	3.2.1.2	Periódico															
Válvula sec.	3.1.2.1	Detallada					2,68E-01	2,68E-01	8,73E-06	1,96E-06				2,68E-01	2,68E-01	2,62E-04	5,20E-04
Válvula sec.	3.1.2.2	Detallada															
Desagüe / BR	3.2.2.1	Detallada					2,68E-01	2,68E-01	8,73E-06	1,96E-06				2,68E-01	2,68E-01	2,62E-04	5,20E-04
Desagüe / BR	3.2.2.2	Detallada															
Válvula sec.	3.1.3.1	Extraordinaria					3,28E+00	3,28E+00	1,07E-04	2,41E-05				3,29E+00	3,28E+00	3,21E-03	6,38E-03
Válvula sec.	3.1.3.2	Extraordinaria	8,00E-01	8,00E-01	1,50E-05	2,91E-06	2,68E-01	2,68E-01	8,73E-06	1,96E-06				1,07E+00	1,07E+00	7,11E-04	1,29E-03

Tipo de Elemento	Código PM	Plan de Mantenimiento	Emisiones directas														
			1.1_GWP	1.1_CO2	1.1_CH4	1.1_N2O	1.2_GWP	1.2_CO2	1.2_CH4	1.2_N2O	1.3	1.4	1.5	1_CO2EQ_GWP	1_CO2EQ_CO2	1_CO2EQ_CH4	1_CO2EQ_N2O
Válvula sec.	3.1.3.3	Extraordinaria															
Desagüe / BR	3.2.3.1	Extraordinaria					**3,28E+00**	**3,28E+00**	**1,07E-04**	**2,41E-05**				**3,29E+00**	**3,28E+00**	**3,21E-03**	**6,38E-03**
Desagüe / BR	3.2.3.2	Extraordinaria	**8,00E-01**	**8,00E-01**	**1,50E-05**	**2,91E-06**	**2,68E-01**	**2,68E-01**	**8,73E-06**	**1,96E-06**				**1,07E+00**	**1,07E+00**	**7,11E-04**	**1,29E-03**
Desagüe / BR	3.2.3.3	Extraordinaria															

Tipo de Elemento	Código PM	Plan de Mantenimiento	Emisiones indirectas													
			2.1	2.2	2	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4
Depósito	1.1.1	Periódico															
Depósito	1.1.2	Periódico															
Depósito	1.1.3	Periódico															
Depósito	1.1.4	Periódico															
Depósito	1.1.5	Periódico															
Depósito	1.1.6	Periódico															
Depósito	1.2.1	Detallada										3,35E+01					3,35E+01
Depósito	1.2.2	Detallada															
Depósito	1.2.3	Detallada										4,92E+01					4,92E+01
Depósito	1.2.4	Detallada										1,09E+00					1,09E+00
Depósito	1.2.5	Detallada															
Depósito	1.3.1	Extraordinaria										3,35E+01					3,35E+01
Depósito	1.3.2	Extraordinaria										3,84E+00					3,84E+00
Depósito	1.3.3	Extraordinaria										4,92E+01					4,92E+01
Depósito	1.3.4	Extraordinaria										1,09E+00					1,09E+00
Depósito	1.3.5	Extraordinaria															

Tipo de Elemento	Código PM	Plan de Mantenimiento	Emisiones indirectas													
			2.1	2.2	2	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4
Tubería	2.1.1	Periódico															
Tubería	2.2.1	Detallada															
Tubería	2.3.1	Extraordinaria															
Tubería	2.3.2	Extraordinaria															
Tubería	2.3.3	Extraordinaria															
Tubería	2.3.4	Extraordinaria										7,06E+02					7,06E+02
Válvula sec.	3.1.1.1	Periódico															
Válvula sec.	3.1.1.2	Periódico															
Desagüe / BR	3.2.1.1	Periódico															
Desagüe / BR	3.2.1.2	Periódico															
Válvula sec.	3.1.2.1	Detallada															
Válvula sec.	3.1.2.2	Detallada					2,89E-02				2,89E-02	1,24E+01		6,12E-02			1,24E+01
Desagüe / BR	3.2.2.1	Detallada															
Desagüe / BR	3.2.2.2	Detallada					1,44E-02				1,44E-02	6,18E+00		3,06E-02			6,21E+00
Válvula sec.	3.1.3.1	Extraordinaria															
Válvula sec.	3.1.3.2	Extraordinaria															

Tipo de Elemento	Código PM	Plan de Mantenimiento	Emisiones indirectas														
			2.1	2.2	2	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4
Válvula sec.	3.1.3.3	Extraordinaria					5,68E-02				5,68E-02	5,13E+01		6,13E-01			5,19E+01
Desagüe / BR	3.2.3.1	Extraordinaria															
Desagüe / BR	3.2.3.2	Extraordinaria															
Desagüe / BR	3.2.3.3	Extraordinaria					5,68E-02				5,68E-02	5,13E+01		6,13E-01			5,19E+01

Tabla 44. Relación de emisiones por Categoría pormenorizada y plan de mantenimiento asociado. Elaboración propia

Código PM	Periódico	Detallada	Extraordinaria	Periódico	Detallada	Extraordinaria	Periódico	Periódico	Detallada	Detallada	Extraordinaria	Extraordinaria
Tipo Elemento	Depósito	Depósito	Depósito	Tubería	Tubería	Tubería	Válvula sec.	Desagüe/ BR	Válvula sec.	Desagüe/ BR	Válvula sec.	Desagüe/ BR
PM / Categoría	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**2.1**	**2.2**	**2.3**	**3.1.1**	**3.2.1**	**3.1.2**	**3.2.2**	**3.1.3**	**3.2.3**
1.1_GWP		4,32E+01	4,32E+01			7,46E+01					8,00E-01	8,00E-01
1.1_CO2		4,32E+01	4,32E+01			7,46E+01					8,00E-01	8,00E-01
1.1_CH4		8,10E-04	8,10E-04			3,04E-03					1,50E-05	1,50E-05
1.1_N2O		1,57E-04	1,57E-04			7,02E-04					2,91E-06	2,91E-06
1.2_GWP	1,23E-01	6,81E+00	1,01E+01	6,51E-01	6,51E-01	2,56E+01	5,35E-02	5,35E-02	2,68E-01	2,68E-01	3,55E+00	3,55E+00
1.2_CO2	1,23E-01	6,81E+00	1,01E+01	6,51E-01	6,51E-01	2,56E+01	5,35E-02	5,35E-02	2,68E-01	2,68E-01	3,55E+00	3,55E+00
1.2_CH4	4,01E-06	2,22E-04	3,29E-04	2,12E-05	2,12E-05	1,02E-03	1,75E-06	1,75E-06	8,73E-06	8,73E-06	1,16E-04	1,16E-04
1.2_N2O	9,02E-07	4,99E-05	7,40E-05	4,77E-06	4,77E-06	2,34E-04	3,92E-07	3,92E-07	1,96E-06	1,96E-06	2,60E-05	2,60E-05
1.3												
1.4												
1.5												
1_CO2EQ_GWP	**1,24E-01**	**5,01E+01**	**5,34E+01**	**6,52E-01**	**6,52E-01**	**1,01E+02**	**5,37E-02**	**5,37E-02**	**2,68E-01**	**2,68E-01**	**4,36E+00**	**4,36E+00**
1_CO2EQ_CO2	**1,23E-01**	**5,01E+01**	**5,33E+01**	**6,51E-01**	**6,51E-01**	**1,00E+02**	**5,35E-02**	**5,35E-02**	**2,68E-01**	**2,68E-01**	**4,35E+00**	**4,35E+00**
1_CO2EQ_CH4	**1,20E-04**	**3,10E-02**	**3,42E-02**	**6,36E-04**	**6,36E-04**	**1,22E-01**	**5,24E-05**	**5,24E-05**	**2,62E-04**	**2,62E-04**	**3,92E-03**	**3,92E-03**
1_CO2EQ_N2O	**2,39E-04**	**5,49E-02**	**6,13E-02**	**1,26E-03**	**1,26E-03**	**2,48E-01**	**1,04E-04**	**1,04E-04**	**5,20E-04**	**5,20E-04**	**7,67E-03**	**7,67E-03**
2.1												
2.2												
2												
3.1												
3.2									2,89E-02	1,44E-02	5,68E-02	5,68E-02
3.3												
3.4												
3.5												
3									**2,89E-02**	**1,44E-02**	**5,68E-02**	**5,68E-02**
4.1		8,38E+01	8,77E+01			7,06E+02			1,24E+01	6,18E+00	5,13E+01	5,13E+01
4.2												
4.3									6,12E-02	3,06E-02	6,13E-01	6,13E-01
4.4												
4.5												
4		**8,38E+01**	**8,77E+01**			**7,06E+02**			**1,24E+01**	**6,21E+00**	**5,19E+01**	**5,19E+01**
5.1												
5.2												
5.3												

Código PM	Periódico	Detallada	Extraordinaria	Periódico	Detallada	Extraordinaria	Periódico	Periódico	Detallada	Detallada	Extraordinaria	Extraordinaria
Tipo Elemento	Depósito	Depósito	Depósito	Tubería	Tubería	Tubería	Válvula sec.	Desagüe/ BR	Válvula sec.	Desagüe/ BR	Válvula sec.	Desagüe/ BR
PM / Categoría	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**2.1**	**2.2**	**2.3**	**3.1.1**	**3.2.1**	**3.1.2**	**3.2.2**	**3.1.3**	**3.2.3**
5.4												
5												
6												
D___						**-3,83E-01**			**-5,06E+00**	**-2,53E+00**	**-3,35E+01**	**-3,35E+01**

- **Establecimiento de la incertidumbre**

$$Incertidumbre = \frac{4 \cdot 4 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{7} = 3{,}29 \rightarrow 3 \rightarrow C$$

Las emisiones tendrán una evaluación cualitativa de C.

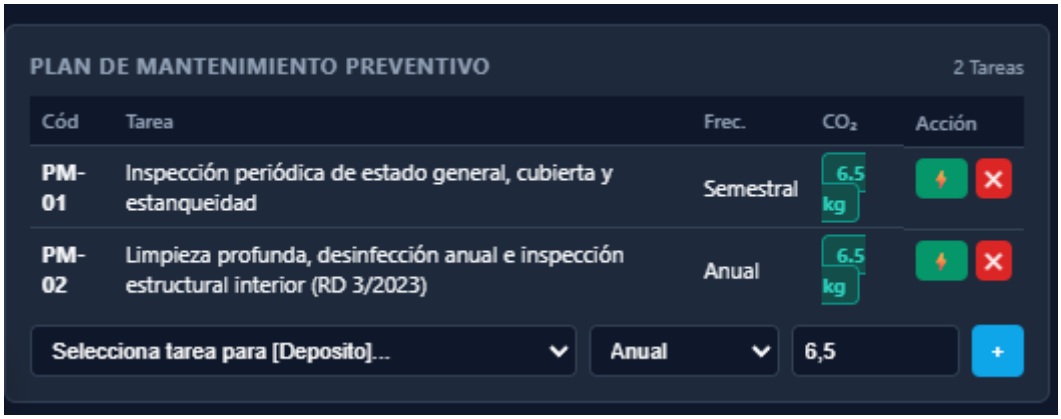
6.2.5. Fase V: Despliegue de la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI

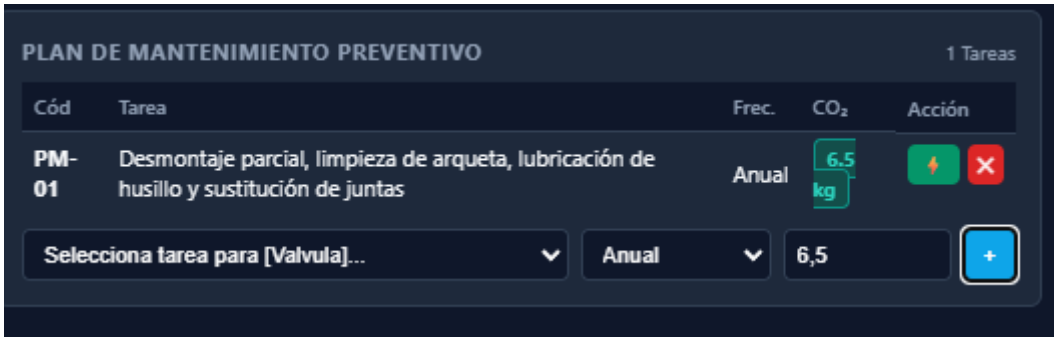
6.2.5.1. Necesidades y desarrollo de soluciones para el Ayuntamiento de Maderuelo

En la visita al Ayuntamiento de Maderuelo se observó la necesidad de integrar el servicio WMS de Catastro con otras cartografías que se pudieran subir, añadir, ocultar y modificar transparencia. Por ello, se añade unos complementos a la aplicación para poder cargar imágenes georreferenciadas (GeoTIFF) y capas vectoriales (en formato GeoJSON).

6.2.5.2. Testeo de los procesos de funcionamiento de la aplicación

- **Comprobación del módulo de mantenimiento GMAO**





- **Comprobación del módulo de Huella de Carbono (CO2):**

MATRIZ CONSOLIDADA DE INDICADORES DE EMISIÓN

Acumulado del activo clasificado por código de vector ambiental

Código	Vector / Gas / Categoría	Unidad	Total Acumulado
1.1_CH4	Metano (CH_4) combustión equipos	kg CH_4	0.0000
1.1_N2O	Óxido nitroso (N_2O) combustión equipos	kg N_2O	0.0000
1.2_GWP	Transporte y maquinaria móvil (GWP)	kg CO_2e	1.3020
1.2_CO2	Dióxido de carbono (CO_2) transporte/vehículos	kg CO_2	1.3020
1.2_CH4	Metano (CH_4) transporte/vehículos	kg CH_4	4.240e-5

INFORME OFICIAL DE HUELLA DE CARBONO (UNE-EN ISO 14064-1 / EN 15804)

Red de Abastecimiento de Maderuelo (Segovia) | Gemelo Digital GIS & OpenBIM 6D/7D

Norma de referencia: ISO 14064-1:2019 / IPCC GWP100 | Generado: 11/9/2026, 23:02:07

FICHA DE ACTIVO HIDRÁULICO: TUB.07

- Identificador IFC GUID: 2v$8W0N9L2Xvhg93_txe5zg
- Modelo / Fabricante: Conducción Fundición Dúctil / PEAD
- Dimensiones y Tipo: DN 200 mm | L: 120 m
- Ubicación Cartográfica: Maderuelo (Cota: N/D m)

GWP TOTAL (1_CO2EQ)	ALCANCE 1 DIRECTO	ALCANCES 3 Y 4 INDIRECTO	MÓDULO D (EVITADAS)
1.30 kg CO2e	1.30 kg CO2e	0.00 kg CO2e	0.00 kg CO2e

Código Vector	Descripción Técnica del Factor / Gas	Categoría ISO	Unidad	Total Acumulado
3	Alcance 3 - Total transporte aguas arriba	Alcance 3	kg CO,e	0.0000
4	Alcance 4 - Total bienes y servicios	Alcance 4	kg CO,e	0.0000
1.1_GWP	Combustión en equipos fijos (GWP)	Alcance 1	kg CO,e	0.0000
1.1_CO2	Dióxido de carbono (CO,) combustión equipos	Alcance 1	kg CO,	0.0000
1.1_CH4	Metano (CH,) combustión equipos	Alcance 1	kg CH,	0.0000
1.1_N2O	Óxido nitroso (N,O) combustión equipos	Alcance 1	kg N,O	0.0000
1.2_GWP	Transporte y maquinaria móvil (GWP)	Alcance 1	kg CO,e	1.3020
1.2_CO2	Dióxido de carbono (CO,) transporte/vehículo	Alcance 1	kg CO,	1.3020
1.2_CH4	Metano (CH,) transporte/vehículos	Alcance 1	kg CH,	4.240e-5
1.2_N2O	Óxido nitroso (N,O) transporte/vehículos	Alcance 1	kg N,O	9.540e-6
1_CO2EQ_GWP	Alcance 1 Directas - Consolidado GWP	Alcance 1	kg CO,e	1.3040
1_CO2EQ_CO2	Alcance 1 Directas - CO, fósil total	Alcance 1	kg CO,	1.3020
1_CO2EQ_CH4	Alcance 1 Directas - CH, equivalente	Alcance 1	kg CO,e	0.0013
1_CO2EQ_N2O	Alcance 1 Directas - N,O equivalente	Alcance 1	kg CO,e	0.0025
3.2	Alcance 3 - Transporte de residuos/químicos	Alcance 3	kg CO,e	0.0000
4.1	Alcance 4 - Bienes y productos adquiridos (A1-A3)	Alcance 4	kg CO,e	0.0000
4.3	Alcance 4 - Servicios y contratas técnicas	Alcance 4	kg CO,e	0.0000
D___	Módulo D - Emisiones evitadas / Reciclaje	Alcance D	kg CO,e	0.0000

Fecha	Cód. PM	Concepto / Operación Técnica Ejecutada	GWP Total Imputado
2026-01-15	2.1	PM-TUB-01: Campaña de detección acústica de fugas y comprobación de presión	+0.65 kg CO2e
2026-01-15	2.2	PM-TUB-02: Inspección detallada con geófono/correlador y purga controlada de tramo	+0.65 kg CO2e

7. ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Una vez probada la metodología en el caso práctico, se procede a elaborar un análisis de viabilidad de la metodología propuesta.

Se ha decidido hacer una valoración económica ya que esta metodología, aparte de para servir a administraciones o entidades de gestión del ciclo integral del agua, puede servir para empresas que puedan optar a licitaciones de contratos de servicio para el mantenimiento de la red de abastecimiento (o de saneamiento) de un municipio o de una zona.

La valoración dispondrá de dos alternativas: Alternativa 1 en la cual se emplearán los medios empleados durante la asignatura de Modelos Avanzados Matemáticos 2 asociados a los sistemas de información geográfica (GIS), metodología BIM, gestión de activos (GMAO) y gestión del impacto ambiental; y la Alternativa 2: en la cual se emplea la metodología desarrollada en el trabajo de investigación.

Una vez establecidas las alternativas, se procede a establecer unos precios unitarios para los recursos empleados en ambas alternativas. Esto permitirá la valoración económica de cada una de las fases.

A continuación, se procederá a evaluar cada una de las fases analizando las dos alternativas propuestas. Durante la realización de la investigación se han registrado los tiempos empleados en el desarrollo de cada fase de la metodología propuesta, a la que se les ha asignado unos recursos materiales y personal. Por último, se determinará el coste unitario por elemento de las dos alternativas.

La valoración tomará de referencia como criterio de viabilidad, viabilidad condicionada y no viabilidad los Costes Indirectos del Precio Base de Licitación (PBL).

El análisis de viabilidad finalizará con la elaboración de un gráfico donde refleje las zonas de viabilidad, viabilidad condicionada y no viabilidad en función de los costes unitarios determinados. Se ha decido representar de esta forma ya que puede facilitar la toma de decisión a la hora de implementar la metodología con términos económicos (relación coste-número de elementos de la red de distribución).

7.1. Establecimiento de los precios unitarios de los recursos empleados

En primer lugar, se identifican los recursos empleados y se establece un precio unitario de cada uno. A continuación, se ofrece la tabla en la que se identifica el recurso, la unidad aplicada, el precio unitario y la fuente de información:

Tabla 45. Precios unitarios de los recursos empleados. Elaboración propia

Recurso	**Unidad**	**Precio unitario (€)**	**Fuente**
Programas GIS			
Licencia de ArcGIS Enterprise Standard durante la duración del contrato (2 años)	Ud	43.000,00	ESRI
Licencia QGIS	Ud	0,00	QGIS
Licencia QField	Ud	0,00	QField (QGIS)
Programas BIM			
Licencia de Autodesk Civil 3D durante la duración del contrato (2 años)	Ud	3.400,00	Autodesk
Licencia de Autodesk Construction Cloud durante la duración del contrato (2 años)	Ud	2.800,00	Autodesk
Licencia Inteligencia Artificial Generativa Gemini Pro (Google) durante 2 años	Ud	440,00	Google
Personal			
Ingeniero Civil (Coste empresa 1800 h/año)	h	27,25	Jobted
Técnico (Coste empresa 1800 h/año)	h	19,53	Jobted

7.2. Evaluación de recursos y costes por fases de la metodología desarrollada

7.2.1. Fase I: Inventario de la red

7.2.1.1. Determinación del Escenario

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Trabajo de gabinete (revisión de la documentación existente)	Técnico	1	19,53	19,53
Trabajo en campo (consulta Ayuntamiento e inspección de la zona)	Técnico	5,5	19,53	107,42

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F I.1.Determinación del Escenario	126,95	25*	5,08
2	F I.1.Determinación del Escenario	126,95	25*	5,08

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.1.2. Digitalización de la cartografía existente

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Georrefenciación de los planos no digitalizados	ArcGIS	1 ud/día*	58,90	58,90
	QGIS	1 ud/día	0,00	0,00
	Técnico	0,25 h	19,53	4,88

** Se consideran el coste de ArcGIS por día (730 días)*

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F I.2. Digitalización de la cartografía existente	63,78	25*	2,55
2	F I.2. Digitalización de la cartografía existente	4,88	25*	0,19

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.1.3. Vectorización de los elementos de la red de distribución

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Establecer la estructura de datos y representar los elementos del plano georreferenciado	ArcGIS	1 ud/día*	58,90	58,90
	QGIS	1 ud/día	0,00	0,00
	Técnico	1 h	19,53	19,53

** Se consideran el coste de ArcGIS por día (730 días)*

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F I.3. Vectorización	78,43	25*	3,14
2	F I.3. Vectorización	19,53	25*	0,78

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.1.4. Comprobación y toma de datos

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Toma de datos en campo	ArcGIS	1 ud/día*	58,90	58,90
	QField	1 ud/día	0,00	0,00
	Técnico	3,50 h	19,53	68,36

** Se consideran el coste de ArcGIS por día (730 días)*

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F I.4. Comprobación y toma datos	127,26	25*	5,09
2	F I.4. Comprobación y toma datos	68,36	25*	2,73

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.1.5. Total Fase I: Inventario de la red

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F I.1.Determinación del Escenario	127,26	25*	5,09
	F I.2. Digitalización de la cartografía existente	63,78	25*	2,55
	F I.3. Vectorización	78,43	25*	3,14
	F I.4. Comprobación y toma datos	127,26	25*	5,09
Total Alternativa 1 Fase I				15,87

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
2	F I.1.Determinación del Escenario	127,26	25*	5,09
	F I.2. Digitalización de la cartografía existente	4,88	25*	0,19
	F I.3. Vectorización	19,53	25*	0,78
	F I.4. Comprobación y toma datos	68,36	25*	2,73
			Total Alternativa 2 Fase I	8,79

7.2.2. Fase II: Definición estratégica de la metodología BIM

7.2.2.1. Requisitos de Información de la Organización (OIR)

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Definición OIR	Ingeniero civil	0,05 h	27,25	1,36

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F II.1 Definición OIR	1,36	25*	0,05
2	F II.1 Definición OIR	1,36	25*	0,05

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.2.2. Requisitos de Información del Activo (AIR)

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Parámetros Generales	Ingeniero civil	0,05 h	27,25	1,36
Integración de la codificación AEAS	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77
Parámetros de mantenimiento y operación	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77
Parámetros de sostenibilidad	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77

En este apartado en la Alternativa 2 solo requiere del Ingeniero ya que, por los ficheros de automatización, no requiere asistencia del técnico.

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F II.2 Definición AIR	34,72	25*	1,39
2	F II.2 Definición AIR	17,71	25*	0,71

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.2.3. Requisitos de Intercambio de Información (EIR)

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Formato de entrega	Técnico	0,05 h	19,53	1,36
Definición de la estructura semántica	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77

Validación mediante IDS	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77

En este apartado en la Alternativa 2 solo requiere del Ingeniero ya que, por los ficheros de automatización, no requiere asistencia del técnico.

Nº Alternativa	**Tarea**	**Coste total (€)**	**Elementos red (ud)**	**Coste por elemento (€/elemento)**
1	F II.3 Definición EIR	31,40	25*	1,26
2	F II.3 Definición EIR	16,19	25*	0,65

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.2.4. Configuración del Entorno Común de Datos (CDE)

Tareas	**Recursos empleados**	**Medición**	**Precio Unitario (€)**	**Coste (€)**
Definición del CDE	Técnico	0,05 h	19,53	1,36
Roles y Responsabilidades	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77
Estado de los modelos	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77
Estructura de las carpetas	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77
Nombrado de los ficheros	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36
	Técnico	0,50 h	19,53	9,77
Control de acceso a la información	Ingeniero civil	0,20 h	27,25	1,36

En este apartado en la Alternativa 2 solo requiere del Ingeniero ya que, por los ficheros de automatización, no requiere asistencia del técnico.

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F II.4 Definición CDE	31,40	25*	1,26
2	F II.4 Definición CDE	16,19	25*	0,65

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.2.5. Total Fase II: Definición estratégica BIM

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F I.1.Determinación del Escenario	27,25	25*	5,09
	F I.2. Digitalización de la cartografía existente	63,78	25*	2,55
	F I.3. Vectorización	78,43	25*	3,14
	F I.4. Comprobación y toma datos	127,26	25*	5,09
Total Alternativa 1 Fase II				4,21

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
2	F I.1.Determinación del Escenario	127,26	25*	5,09
	F I.2. Digitalización de la cartografía existente	4,88	25*	0,19
	F I.3. Vectorización	19,53	25*	0,78
	F I.4. Comprobación y toma datos	68,36	25*	2,73

Total Alternativa 2 Fase II	1,09

7.2.3. Fase III: Incorporación y establecimiento de los planes de mantenimiento a los activos

7.2.3.1. Identificación de los elementos existentes en la red

Tareas	**Recursos empleados**	**Medición**	**Precio Unitario (€)**	**Coste (€)**
Identificación de los elementos existentes en la red	Técnico	0,05 h	19,53	0,97
	Ingeniero civil	0,05 h	27,25	1,36

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	**Tarea**	**Coste total (€)**	**Elementos red (ud)**	**Coste por elemento (€/elemento)**
1	F III.1. Identificación elementos	2,33	25*	0,09
2	F III.1. Identificación elementos	2,33	25*	0,09

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.3.2. Definición y establecimiento de los planes de mantenimiento por elemento

Tareas	**Recursos empleados**	**Medición**	**Precio Unitario (€)**	**Coste (€)**
Definición y establecimiento PM	Ingeniero civil	0,50 h	27,25	13,63

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F III.2. Definición y establecimiento PM	13,63	25*	0,54
2	F III.2. Definición y establecimiento PM	13,63	25*	0,54

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.3.3. Creación del fichero para la incorporación de los planes de mantenimiento en la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Creación fichero app	Técnico	0,05 h	19,53	0,97
Importación manual a GMAO	Técnico	1,25 h	19,53	24,41

En este apartado se considera que la Alternativa 1 y 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F III.3. Creación fichero app	24,41	25*	0,98
2	F III.3. Creación fichero app	0,97	25*	0,04

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.3.4. Total Fase III: GMAO

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F III.1. Identificación elementos	2,33	25*	0,09

	F III.2. Definición y establecimiento PM	13,63	25*	0,54
	F III.3. Creación fichero app	24,41	25*	0,98
Total Alternativa 1 Fase III				1,61

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
2	F III.1. Identificación elementos	2,33	25*	0,09
	F III.2. Definición y establecimiento PM	13,63	25*	0,54
	F III.3. Creación fichero app	0,97	25*	0,04
Total Alternativa 2 Fase III				0,67

7.2.4. Fase IV: Incorporación y establecimiento del inventario de emisiones de GEI en las operaciones de los planes de mantenimiento

7.2.4.1. Definición de los límites organizacionales y operacionales

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Definición de los límites	Ingeniero civil	0,05 h	27,25	1,36

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F IV.1. Definición de los límites	1,36	25*	0,05

2	F IV.1. Definición de los límites	1,36	25*	0,05

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.4.2. Inventario de emisiones

Tareas	**Recursos empleados**	**Medición**	**Precio Unitario (€)**	**Coste (€)**
Inventario de maquinaria Emisiones de las maquinas inventariadas Inventario de materiales Emisiones de los materiales inventariados	Ingeniero civil	3,00 h	27,25	81,75

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	**Tarea**	**Coste total (€)**	**Elementos red (ud)**	**Coste por elemento (€/elemento)**
1	F IV.2. Inventario de las emisiones	81,75	25*	3,27
2	F IV.2. Inventario de las emisiones	81,75	25*	3,27

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.4.3. Definición de los límites organizacionales y operacionales

Tareas	**Recursos empleados**	**Medición**	**Precio Unitario (€)**	**Coste (€)**
Definición de los límites	Ingeniero civil	0,05 h	27,25	1,36

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F IV.3. Definición de los límites	1,36	25*	0,05
2	F IV.3. Definición de los límites	1,36	25*	0,05

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.4.4. Estimación de la incertidumbre

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Estimación de la incertidumbre	Ingeniero civil	0,50 h	27,25	13,63

En este apartado se considera tanto que la Alternativa 1 como la Alternativa 2 requieren de estos trabajos:

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F IV.4. Estimación incertidumbre	13,63	25*	0,55
2	F IV.4. Estimación incertidumbre	13,63	25*	0,55

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.4.5. Elaboración del informe GEI (Anexo F)

Tareas	Recursos empleados	Medición	Precio Unitario (€)	Coste (€)
Elaboración del informe GEI	Ingeniero civil	1,00 h	27,25	27,25

En este apartado solo se considera que tiene coste la Alternativa 1 ya que en la Alternativa 2 (metodología propuesta), el informe se genera automáticamente.

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F IV.5. Elaboración Informe GEI	27,25	25*	1,09
2	F IV.5. Elaboración Informe GEI	0,00	25*	0,00

** Se consideran los depósitos como 5 elementos de la red de distribución*

7.2.4.6. Total Fase IV: Informe GEI

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F IV.1. Definición de los límites	1,36	25*	0,05
	F IV.2. Inventario de las emisiones	81,75	25*	3,27
	F IV.3. Definición de los límites	1,36	25*	0,05
	F IV.4. Estimación incertidumbre	13,63	25*	0,55
	F IV.5. Elaboración Informe GEI	27,25	25*	1,09
Total Alternativa 1 Fase IV				1,61

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
2	F IV.1. Definición de los límites	1,36	25*	0,05
	F IV.2. Inventario de las emisiones	81,75	25*	3,27
	F IV.3. Definición de los límites	1,36	25*	0,05
	F IV.4. Estimación incertidumbre	13,63	25*	0,55

	F IV.5. Elaboración Informe GEI	0,00	25*	0,00
			Total Alternativa 2 Fase IV	0,67

7.2.5. Fase V: Desarrollo y despliegue de la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI

Total Fase II: Definición estratégica BIM

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1	F V.1 Necesidades y desarrollo Ayto. Maderuelo	0,00	25*	0,00
	F V.2 Testeo Aplicación	0,00	25*	0,00
			Total Alternativa 1 Fase II	0,00

Nº Alternativa	Tarea	Coste total (€)	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
2	F V.1 Necesidades y desarrollo Ayto. Maderuelo	13,63	25*	0,55
	F V.2 Testeo Aplicación	13,62	25*	0,54
			Total Alternativa 2 Fase V	1,09

7.2.6. Coste total por Alternativas

Tabla 46. Coste total desglosado de Alternativa 1. Alternativa con recursos comerciales. Elaboración propia

Alternativa	Fases	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
1. Alternativa con recursos comerciales	Fase I: Inventario de la red	25	15,87
	Fase II: Definición estratégica de la metodología BIM	25	4,21
	Fase III: Incorporación y establecimiento de los planes de mantenimiento a los activos	25	1,61
	Fase IV: Incorporación y establecimiento del inventario de emisiones de GEI en las operaciones de los planes de mantenimiento	25	1,61
	Fase V: Desarrollo y despliegue de la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI	25	0,00
	Total Alternativa 1	**25**	**23,30**

Tabla 47. Coste total desglosado de Alternativa 2. Alternativa con la metodología propuesta. Elaboración propia

Alternativa	Fases	Elementos red (ud)	Coste por elemento (€/elemento)
2. Alternativa con la metodología propuesta	Fase I: Inventario de la red	25	8,79
	Fase II: Definición estratégica de la metodología BIM	25	1,09
	Fase III: Incorporación y establecimiento de los planes de mantenimiento a los activos	25	0,67
	Fase IV: Incorporación y establecimiento del inventario de emisiones de GEI en las operaciones de los planes de mantenimiento	25	0,67
	Fase V: Desarrollo y despliegue de la aplicación GIS-BIM-GMAO-GEI	25	1,09
	Total Alternativa 2	**25**	**12,31**

7.3. Definición del criterio de viabilidad

Como criterio de viabilidad se va a emplear el porcentaje destinado a imprevistos surgidos durante la ejecución que no hubiesen tomados en consideración a la hora de redactar el pliego.

Se decide asociar el coste de la aplicación de esta metodología a los costes indirectos y no a los gastos generales ya que esta tecnología se considera clave para desarrollar el contrato de servicios empleando la metodología BIM en particular y no como un software asociado a la empresa (por lo que entraría en los Gastos Generales).

Para una obra terrestre convencional, según se recoge en la literatura de la ingeniería civil desde 1968 (MOPU, 1968), se establece en un 1%.

Dada la formulación de cálculo del presupuesto base de licitación (PBL), el cual aparece anunciado en las licitaciones de contratos, hay que determinar el porcentaje de imprevistos de costes indirectos (1%) respecto al PBL, ya que es tentador aplicar el 1% del PBL para el CI y es un error grave por la composición del PBL.

$$\%PBL = \frac{KI}{(1+CI)\cdot(1+CC+BI)}\cdot 100$$

Para el 1%:

$$\%PBL = \frac{0{,}01}{(1+0{,}06)\cdot(1+0{,}13+0{,}06)}\cdot 100 = 0{,}7927\%$$

Para el 6%:

$$\%PBL = \frac{0{,}06}{(1+0{,}06)\cdot(1+0{,}13+0{,}06)}\cdot 100 = 4{,}7566\%$$

El criterio de viabilidad será el siguiente:

- Viable (V): Cuando el coste por elemento esté por debajo del 1% del CI (V<0,79% del PBL)

- Viable condicionado (VC): Cuando el coste por elemento esté entre el 1% y el 6% de los costes indirectos (0,79% ≤ VC ≤ 4,76%)

- No viable (NV): Cuando el coste por elemento esté por encima del 6% de los costes indirectos (NV>4,76%)

7.4. Gráfico para la toma de decisiones

Para completar el análisis de viabilidad, se confecciona un gráfico en el cual aparecen los siguientes elementos:

- Eje abscisas (X): Precio de licitación base (PBL) por elemento de la red de distribución (€/elemento)
- Eje ordenadas (Y): Coste unitario de las Alternativas
- Áreas sombreadas: Viabilidad
    - En rojo las zonas que se consideran no viables (NV), amarillo/naranja los viables condicionados (VC) y en verde los viables (V) según los costes indirectos.
- Líneas continuas: Coste por elemento de las Alternativas aplicando todas las fases de la metodología.
    - En rojo la Alternativa 1 con los recursos comerciales
    - En azul la Alternativa 2 con la metodología propuesta
- Líneas discontinuas: Coste por elemento de las Alternativas consideradas sin aplicar los trabajos de toma de datos (F I.4.)
    - En rojo la Alternativa 1 con los recursos comerciales
    - En azul la Alternativa 2 con la metodología propuesta

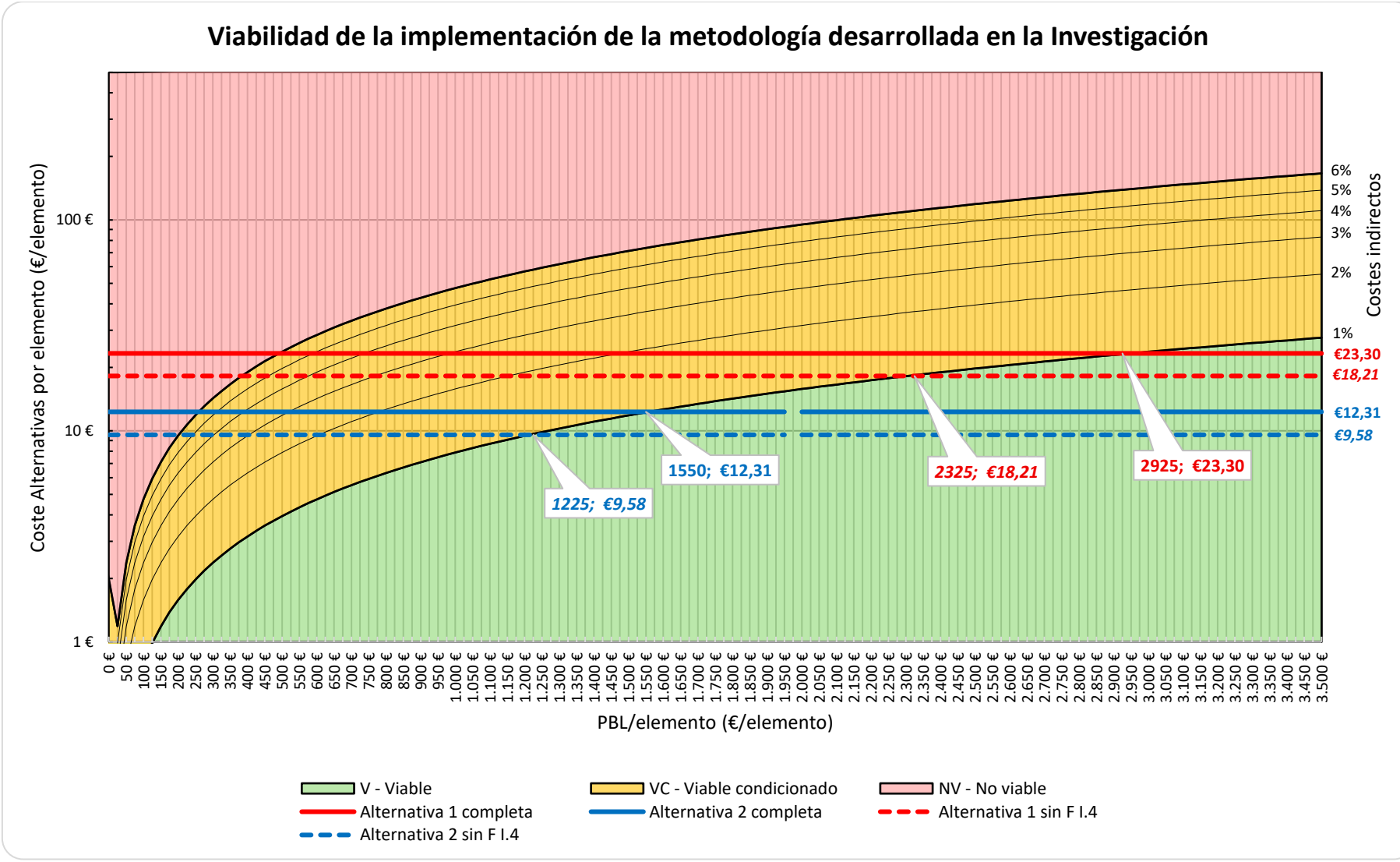


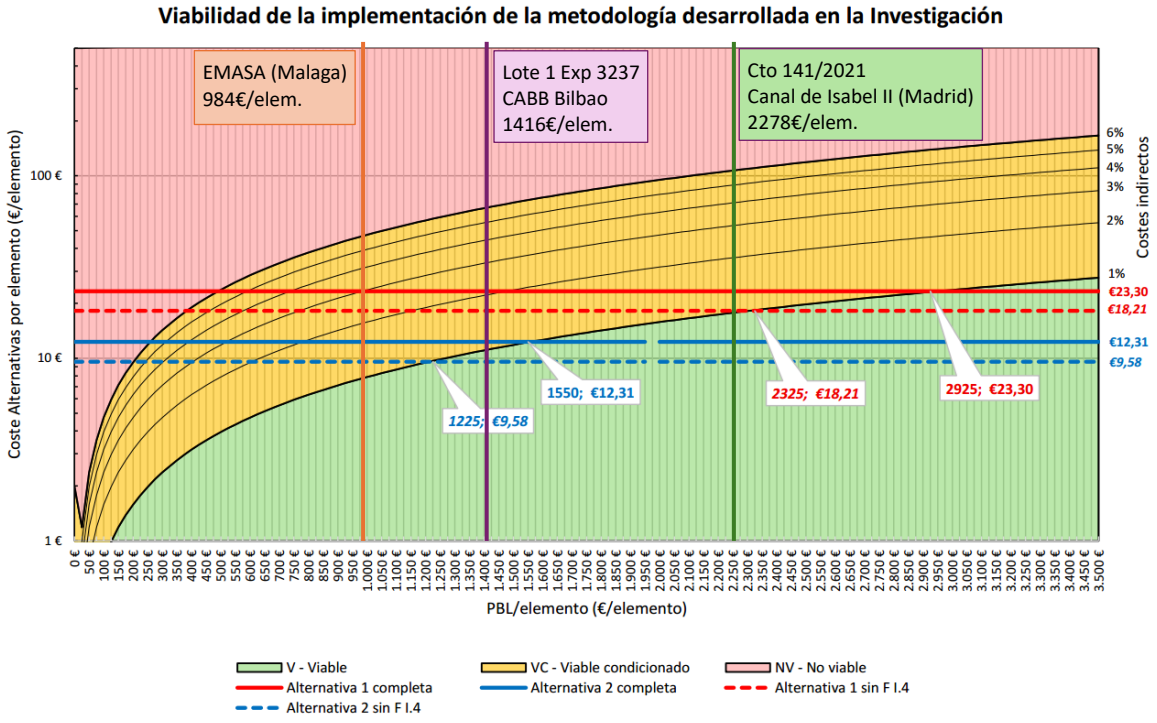
Figura 44. Viabilidad de la implementación de la metodología desarrollada en la Investigación. Elaboración propia

7.5. Discusión

En primer lugar, se observa que la Alternativa 2 (Metodología propuesta) presenta una reducción próxima al 50% de costes significativa frente a la Alternativa 1 (12,31€ frente 23,30 €). La implementación de un sistema que no dependa de programas de pago o licencias restringidas hace que el coste caiga.

Esta reducción del precio implica una mayor accesibilidad a la tecnología que le da una oportunidad a municipios como Maderuelo de implementar esta forma de trabajar, pero también hace que el sistema se quede sin una garantía de servicio como lo que ofrecen los programas comerciales, por lo que si ocurre algún problema o no se actualiza con el paso del tiempo es muy probable que caiga en desuso y se pierda la motivación de la metodología.

Otro de los efectos a destacar es el de la disponibilidad de buena información cartográfica al inicio del proceso, ya que como se puede ver, el levantamiento y la comprobación de datos en campo implica una reducción del 20% aproximadamente en ambas alternativas. En este caso ha sorprendido que el empleo de programas open source como es QField no tiene un impacto significativo en el coste unitario frente a alternativas comerciales a la hora de tomar datos en campo.



Observando el primer cruce de la Alternativa 2 descartando la toma de datos en campo (sin Fase I.4) el umbral de viabilidad plena se establece en los 1.225€/elemento. Para tener un grado de magnitud, el precio licitación base por elemento en contrato de servicios de mantenimiento de redes de distribución se encuentran entre los 984 €/elemento en el caso del Contrato 26-713 lote 1 de la Empresa Municipal de Aguas de Málaga (EMASA) y los 2278 €/elemento en el caso del Contrato 141/201 del Canal de Isabel II en Madrid. En este caso, casos como la CBB de Bilbao que ronda los 1416 €/elemento le sería prácticamente viable la implementación de la metodología desde cero y el Consorcio posee la red cartografiada por lo que estaría dentro de la franja de viabilidad. EMASA tendría que asumir un sobrecoste entorno al 0,75% del CI ya comprometido, aunque si la premisa es hacer un esfuerzo por la digitalización del sistema, el beneficio se haría notar a corto plazo. Canal de Isabel II hace patente su inversión en digitalización e I+d+I y se puede observar como el PBL por elemento está prácticamente en la línea de corte de la Alternativa 1 sin toma de datos en campo. Todas las opciones hacen patente

1. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

1.1. Conclusiones

1) Desarrollo de un marco metodológico integral

La primera de las conclusiones es dar respuesta a uno de los objetivos principales: desarrollar y validad un marco metodológico integral, la respuesta es **sí pero condicionada**.

Ha sido posible desarrollar un marco metodológico integral pero no ha logrado la fusión de todos los complementos en una misma aplicación, que era uno de las motivaciones con las que empezaron la idea de desarrollar esta investigación.

El desarrollo de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial permite elaborar artefactos como el visor GIS-BIM-GMAO-GEI pero no con plena funcionalidad. Se ha observado que en cuanto a la parte de GIS el visor funciona correctamente, permite el intercambio de datos entre ficheros de distinta tipología y eso hace que configurar un sistema de información geográfica con complementos como un GMAO a pequeña escala o configurar un inventario de gases de efecto invernadero sea posible.

Sin embargo, por la parte de los modelos realizados con formato IFC, para obtener datos no hay gran dificultad ya que en realidad es un texto plano con una codificación “simple” (sin contar con la extensa librería de clasificaciones que tiene) y eso se ha comprobado que permite la interacción con otros programas sin estar preparados para abrir ficheros IFC. Esa cualidad le da una oportunidad para que, mediante aplicaciones con lenguajes de programación como Python, permitan interactuar con programas comerciales de gestión de activos (ya sea Máximo, Hanna o incluso una base de datos de Oracle). También para la modificación de campos dentro del fichero es relativamente sencillo (si no tiene una geometría compleja).

El problema viene cuando se trata de editar geometrías o propiedades debido a su sistema de organización, el cual posee identificadores que pueden desbaratar el modelo si no se modifican correctamente, por lo que es complejo, por el momento, generar un programa de código abierto que permita la modificación de las geometrías.

Sin embargo, si que mediante la aplicación de diversos scripts (que hay que hacerlos a medida según el modelo que esté cargado en el visor) se pueden generar ficheros puente que permitan interactuar con, prácticamente, cualquier programa.

2) Valorar la viabilidad de dicho proceso

La segunda de las conclusiones es si el proceso de desarrollo de la metodología integral es viable, y si, es viable.

Se ha observado una reducción del coste de más del 50% frente a medios convencionales y software comercial estándar, lo que proporciona una oportunidad a sistemas de distribución que no tienen tantos recursos como para permitirse una inversión considerable y poder tener un pequeño sistema de gestión de mantenimiento que les permita realizar un mantenimiento mínimo de la red sin suponer mucho esfuerzo tanto económico como de personal.

1.2. Futuras líneas de trabajo

El desarrollo de esta metodología mediante este método, empleando programación libre y personalizada, abre líneas de trabajo interesantes relacionadas con el modelo desarrollado en este trabajo:

- Traerse la metodología japonesa para la evaluación del estado de las redes de distribución a través de conformar unos KPIs que permitan conocer el estado real de la red.

- Seguir investigando y añadir más módulos en la dimensión 8D (Seguridad y Salud)

- Conseguir un módulo interoperable entre los modelos generados con esta metodología y programas de simulación de redes, ya sea como EPANET o Allievi. Sería una aplicación muy útil y fácilmente incorporable al sistema desarrollado en este TFM.

1.3. Reflexión sobre el trabajo

La elaboración de esta investigación me ha dejado claro que es necesario ponerse en marcha con la implementación de la metodología BIM en la gestión de activos, sobre todo en el sector de la ingeniería hidráulica, ya que no está tan desarrollado como puedan estar otros sectores. Estos

trabajos permiten mirar más allá del día a día en el trabajo o en la escuela e investigar, aunque no se consiga lo deseado, para encontrar herramientas que puedan mejorar los procesos, que en el caso del sector del agua implica un menor número de fugas, una mayor fiabilidad y una mejor gestión del recurso más preciado, el agua.

REFERENCIAS

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (2023) *Ciencia y Agua. Manuel Lorenzo Pardo, Ingeniero Hidráulico [CEDEX], 2023*

IPCC. (2022). Climate Change 2022: *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, & B. Rama, Eds.). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO]. (2024). *Inventario de presas y embalses de España*. Gobierno de España.

Asociación de Empresas de Constructores y Concesionarias de Infraestructuras [SEOPAN]. (2025). *Infraestructuras de agua, medioambiente y energía: Necesidades de reposición*. SEOPAN. https://seopan.es

iAgua. (2018, 11 de octubre). *¿Cuál es la antigüedad de la red de alcantarillado de agua en España?* iAgua Blogs. https://www.iagua.es

TecnoAqua. (2022). *Radiografía del servicio del agua urbana en España: Datos consolidados del envejecimiento de instalaciones*. TecnoAqua. https://www.tecnoaqua.es

Garrido, A., Martínez, J., & Santos, M. (2026). *Las infraestructuras del sector del agua: Diagnóstico y retos de financiación*. Funcas. https://www.funcas.es

Comisión Interministerial BIM [CIBIM]. (2023). *Plan para la incorporación de la metodología BIM en la contratación pública (Real Decreto 393/2023*). Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, Gobierno de España.

Ministerio de Hacienda. (2026). *Plataforma de Contratación del Sector Público*. Gobierno de España. https://contrataciondelestado.es

Asociación de Empresas de Constructores y Concesionarias de Infraestructuras [SEOPAN]. (2025). *Informe de licitación pública y necesidades de inversión en infraestructuras prioritarias en España*. SEOPAN.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO]. (2023). *Guía técnica para la digitalización de los sistemas de abastecimiento urbano bajo el marco del PERTE del Agua*. Gobierno de España.

Agencia Catalana del Agua. (2025). *Plan de gestión del distrito de cuenca fluvial de Cataluña y presupuestos de explotación del saneamiento*. Generalitat de Catalunya.

Asociación de Empresas de Constructores y Concesionarias de Infraestructuras [SEOPAN]. (2025). *Informe de licitación pública y necesidades de inversión en infraestructuras prioritarias en España*. SEOPAN.

Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento [AEAS] y Asociación de Empresas Gestoras de los Servicios de Agua Urbana [AGA]. (2024*). Estudio nacional de suministro de agua potable y saneamiento en España (XVIII Edición)*. AEAS.

Canal de Isabel II, S.A. (2025). *Memoria anual de gestión de infraestructuras de abastecimiento y depuración de la Comunidad de Madrid*. Canal de Isabel II.

Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana [EPSAR]. (2024). *Presupuestos y contratos de explotación del sistema de depuración autonómico*. Generalitat Valenciana.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO]. (2023). *Planes Hidrológicos de tercer ciclo (2022-2027) y directrices de conservación de la infraestructura hidráulica del Estado*. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es

Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento [AEAS]. (2022). *Manual de gestión de activos en redes de agua urbana: Buenas prácticas y lecciones aprendidas*. AEAS.

Canal de Isabel II, S.A. (2025). *Plan Estratégico e informe de gestión: Sostenibilidad y digitalización de las operaciones de mantenimiento*. Canal de Isabel II.

Asociación Española de Agua Urbana [DAQUAS] (2026) *Jornada Metodología BIM en las obras del MAPA: digitalización, eficiencia y gestión integral*. Grupo BIM CT-12 I+D+i – DAQUAS

Asociación de Empresas de Constructores y Concesionarias de Infraestructuras [SEOPAN]. (2025). *La digitalización de las infraestructuras del ciclo del agua: Análisis del impacto BIM y los fondos NextGeneration*. SEOPAN.

IPCC. (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, & S. Federici, Eds.). IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITECO]. (2023). *Estrategia Nacional de Economía Circular y directrices de sostenibilidad en la planificación hidrológica (2022-2027).* Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es

Plannerly Help Articles. (s. f.). *ISO 19650 Update 2026: Proposed Changes and What They Mean*. https://help.plannerly.com/en/article/137-understanding-the-proposed-iso-19650-revisions

ANEXO 1. CONVERSOR IFC-GEOJSON

Código desarrollado en Python:

```
import ifcopenshell
import ifcopenshell.util.element
import ifcopenshell.util.placement
import json
import os


def actualizar_geojson_con_ifc(ifc_filepath, geojson_filepath):
    """
    Proceso ETL incremental: Extrae activos de un archivo IFC4x3 y los añade
    o actualiza en un archivo GeoJSON existente, garantizando la integridad referencial.
    """

    # 1. Carga e instanciación del GeoJSON existente
    coleccion_geojson = {"type": "FeatureCollection", "features": []}

    if os.path.exists(geojson_filepath):
        try:
            with open(geojson_filepath, 'r', encoding='utf-8') as f:
```

```
            coleccion_geojson = json.load(f)
        except json.JSONDecodeError:
            print("Error estructural en GeoJSON. Se inicializará una nueva colección.")

    # Diccionario para indexación rápida usando el GUID como Clave Primaria
    mapa_features = {f["properties"]["GUID"]: f for f in coleccion_geojson["features"] if "GUID" in f["properties"]}

    # 2. Carga del Modelo de Información del Activo (AIM)
    modelo = ifcopenshell.open(ifc_filepath)
    valvulas = modelo.by_type("IfcValve")

    contadores = {"procesados": 0, "nuevos": 0, "actualizados": 0}

    # 3. Iteración, Extracción y Transformación
    for valvula in valvulas:
        guid = valvula.GlobalId
        nombre = valvula.Name or "Elemento_Sin_Clasificar"

        # Manejo de excepciones para activos sin ubicación espacial definida
        try:
```

```
            matriz_loc = ifcopenshell.util.placement.get_local_placement(valvula.ObjectPlacement)
            x, y = matriz_loc[0][3], matriz_loc[1][3]
        except Exception:
            continue # Se omite el elemento al no ser representable en cartografía

        # Extracción Semántica de Psets (Mapeo de Datos Ambientales y de Mantenimiento)
        psets = ifcopenshell.util.element.get_psets(valvula)
        gwp = psets.get("Pset_EnvironmentalImpactIndicators", {}).get("GlobalWarmingPotential", 0.0)
        vida_util = psets.get("Pset_MaintainableEntity", {}).get("ExpectedLife", 0)

        # Construcción del nodo vectorial (Feature)
        nueva_feature = {
            "type": "Feature",
            "geometry": {"type": "Point", "coordinates": [x, y]},
            "properties": {
                "GUID": guid,
                "Elemento": nombre,
                "Categoria_IFC": "IfcValve",
                "GWP_kgCO2eq": round(gwp, 2),
                "VidaUtil_Anos": vida_util
```

```
        }
    }


    # 4. Lógica de Inserción / Actualización Idempotente
    if guid in mapa_features:
        mapa_features[guid].update(nueva_feature)
        contadores["actualizados"] += 1
    else:
        coleccion_geojson["features"].append(nueva_feature)
        mapa_features[guid] = nueva_feature
        contadores["nuevos"] += 1

    contadores["procesados"] += 1


# 5. Volcado y persistencia de datos
with open(geojson_filepath, 'w', encoding='utf-8') as f:
    json.dump(coleccion_geojson, f, ensure_ascii=False, indent=4)
```

ANEXO 2. ARCHIVO IDS DE VALIDACIÓN DE METADATOS IFC

Código desarrollado en XML:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>

<ids:ids xmlns:ids="http://standards.buildingsmart.org/IDS"
xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">



 <!-- 1. METADATOS DEL DOCUMENTO -->

 <ids:info>

  <ids:title>Auditoría AIM - Red de Abastecimiento Municipal</ids:title>

  <ids:description>Verificación de requisitos de Mantenimiento y Clasificación AEAS para el
GMAO.</ids:description>

  <ids:author>Gestor Ciclo Integral del Agua</ids:author>

  <ids:date>2026-08-29</ids:date>

 </ids:info>



 <!-- 2. REGLAS DE VALIDACIÓN -->

 <ids:specifications>



  <!-- ESPECIFICACIÓN: Requisitos para Depósitos de Almacenamiento -->

  <ids:specification name="Req_Deposito_GMAO" description="Todos los depósitos deben
tener Vida Útil y Código AEAS" ifcVersion="IFC4X3_ADD1">
```

```
<!-- A QUÉ ELEMENTOS APLICA LA REGLA (Applicability) -->
<ids:applicability>
 <ids:entity>
  <ids:name>
   <ids:simpleValue>IFCTANK</ids:simpleValue>
  </ids:name>
 </ids:entity>
</ids:applicability>

<!-- QUÉ SE LE EXIGE A ESOS ELEMENTOS (Requirements) -->
<ids:requirements>

 <!-- Requisito 1: Debe tener Vida Útil (Entero) -->
 <ids:property dataType="IfcInteger">
  <ids:propertySet>
   <ids:simpleValue>Pset_MaintainableEntity</ids:simpleValue>
  </ids:propertySet>
  <ids:name>
   <ids:simpleValue>ExpectedLife</ids:simpleValue>
  </ids:name>
 </ids:property>
```

```
    <!-- Requisito 2: Debe estar clasificado según AEAS -->
    <ids:classification>
      <ids:system>
        <ids:simpleValue>Guía de Clasificación BIM AEAS</ids:simpleValue>
      </ids:system>
      <!-- El valor no puede estar vacío -->
      <ids:value>
        <xs:pattern value=".*"/>
      </ids:value>
    </ids:classification>

  </ids:requirements>
 </ids:specification>

</ids:specifications>
</ids:ids>
```

ANEXO 3. ACRONIMOS PARA EL NOMBRADO DE FICHEROS EN EL CDE

Nivel 1	Nivel 2	Tipo de documento
ACT		Acta
	ARU	Acta de reunión
BIM		Building Information Modelling
	AIR	Requisitos de información del activo (Asset Information Requirement)
	BEP	Plan de ejecución BIM
	EIR	Requisitos de intercambio de información (Exchange Information Requirements)
	M2D	Modelo de planos
	M3D	Modelo 3D
	MFD	Modelo Federado
	MID	Programa general de desarrollo de la información (Master Information Delivery Plan)
	MOD	Modelo BIM
	MOP	Modelo de información OpenBIM
	NPU	Nube de Puntos
	OBJ	Objeto BIM
COM		Comunicación
	COM	Comunicación
	ODC	Solicitud de orden de cambio
	PRP	Propuesta
	SOI	Solicitud de información
APY		Documento de apoyo
	ANE	Anejo
	GUI	Guía

Nivel 1	Nivel 2	Tipo de documento
	INT	Instrucción
	LIS	Listado
	MAN	Manual
	NOR	Norma
	PLL	Plantilla
CAL		Control de calidad
	CAL	Control de calidad
	PPI	Programa de puntos de inspección
CAU		Cálculo
	CAU	Cálculo
	CST	Cálculo estructural
EST		Estudio
	EET	Estudio técnico
	EIA	Estudio de impacto ambiental
	ESS	Estudio de seguridad y salud
	EST	Estudio
GES		Gestión
	GES	Gestión
	GNT	Cronograma de actividades o Gantt
	LCO	Lista de comprobación
	LEN	Listado de entregables
	OBC	Seguimiento de objetivos de calidad
INC		Información contractual

Nivel 1	Nivel 2	Tipo de documento
	CON	Contrato
	PLD	Pliego administrativo
MEM		Memoria
	MEM	Memoria
PLN		Plan
	PAB	Plan de calidad ambiental
	PCA	Plan de calidad
	PCO	Plan de comunicación
	PEN	Plan de ensayos
	PGM	Plan de gestión ambiental
	PGR	Plan de gestión de residuos
	PLN	Plan
	PLO	Plan de Obra
	PSS	Plan de seguridad y salud
PLA		Plano
	CAD	Dibujo de CAD
	CRQ	Croquis
	MAP	Mapa
	PLA	Plano
PPT		Pliego de prescripciones técnicas
	PPT	Pliego de prescripciones técnicas
PRE		Presupuesto
	BPR	Base de precios
	CPR	Cuadro de precios

Nivel 1	**Nivel 2**	**Tipo de documento**
	MED	Mediciones
	PRE	Presupuesto
	RSP	Resumen de presupuesto
PUB		Publicidad
	CAT	Cartel
	PRS	Presentación
VIS		Visualización
	FOT	Fotografía
	IFA	Infografía
	IMG	Imagen
	SIM	Simulación
	VID	Video
	VIS	Visualización
XXX		Sin clasificar
	XXX	Sin clasificar

Acrónimo	**Estado**
S0	Trabajo en curso
S1	Pendiente de revisión por Responsable BIM (Encargado externo)
S2	Pendiente de revisión por Coordinador BIM (Técnico gestor) - (Aprobado por Responsable BIM (Encargado Externo))
S3	Pendiente de revisión por Responsable BIM (Ingeniero gestor) - (Aprobado por Coordinador BIM (Técnico Gestor))
S4	Pendiente de revisión por Supervisor P-ONE (Aprobado por Responsable BIM)

AF	Publicado