

Gestión de Estructuras mediante la Metodología BIM y el análisis multicriterio

Management of Structures through BIM Methodology and a multi-criteria analysis.

Jorge Jerez Cepa ^a, Marcos García Alberti ^b y María Belén Muñoz-Medina ^c

^a Doctorando E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. jorge.jerez.cepa@upm.es

^b Profesor Titular E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. marcos.garcia@upm.es

^c Profesor Ayudante Doctor E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. mariabelen.munoz@upm.es

RESUMEN

La gestión de la información en el ciclo de vida de una estructura es fundamental para poder abarcar la conservación del parque envejecido de infraestructuras en España. La adopción de una buena estrategia de conservación depende de numerosos factores además de su desempeño resistente, por lo que un análisis objetivado de todos ellos puede contribuir a optimizar los recursos disponibles. Este artículo presenta un proceso para enriquecer esta toma de decisiones mediante un análisis multicriterio objetivado por el método de la entropía a través de su modelo BIM, para un puente de la autovía de circunvalación M-30.

ABSTRACT

The management of information in the life cycle of a structure is fundamental to be able to cover the preservation of the aging infrastructure stock in Spain. The adoption of a good preservation strategy depends on many factors in addition to its resilient performance, so an objective analysis of all of them can contribute to optimize the available resources. This article presents a method to improve this decision-making process by means of a multi-criteria analysis objectified by the entropy method through its BIM model, for a bridge of the M-30 ring road.

PALABRAS CLAVE: BIM, Gestión y Mantenimiento de Estructuras, Análisis Multicriterio, Calle 30.

KEYWORDS: BIM, Facility Management of Structures, Multicriteria Analysis, Calle 30.

1. Introducción

La gestión de la información es cada vez más relevante en el ciclo de vida de un activo (LCA, por sus siglas en inglés). El parque público de infraestructuras en España se encuentra cada vez más envejecido por lo que la Transformación Digital del sector de la Arquitectura, Ingeniería, Construcción y Operación (AECO, por sus siglas en inglés) debe desempeñar una función primordial para poder dar asistencia en la gestión de cada una de ellas [1]. La metodología BIM (Building Information Modelling) resulta fundamental en este proceso, pudiendo canalizar toda la información a través de su modelo virtual

[2]. Sin embargo, la adopción de esta tecnología es compleja y aún se encuentra poco implementada en el sector, especialmente en fases de explotación y conservación que, por otro lado, abarcan la mayoría de los recursos disponibles en a lo largo de su LCA. El acceso a los datos sin el perjuicio por en el uso continuado de aplicaciones específicas del modelado BIM es uno de los aspectos a superar para una implementación eficaz en la conservación del patrimonio [3].

En el caso de los puentes, se han llevado a cabo algunos avances relevantes en la implementación

del BIM para su conservación [4], especialmente en técnicas de monitoreo [5] y auscultación de la estructura que permiten disponer de información actualizada de su estado o facilitar la identificación de daños mediante el reconocimiento automático de imágenes captadas desde vehículos autónomos [6]. Disponer de esta información junto con la ponderación de otros parámetros de su entorno de manera rápida y sencilla es fundamental para los administradores de la estructura, facilitando una adaptación de la política de conservación a seguir.

En las siguientes secciones se aborda un caso de estudio simulado para uno de los puentes que conforman la autopista de circunvalación urbana Madrid-Calle 30.

2. Metodología

El objetivo de esta investigación es aportar un proceso sistemático para mejorar el conocimiento sobre el estado de una estructura y enriquecer la toma de decisiones para su gestión, tal y como se recoge en la figura 1.

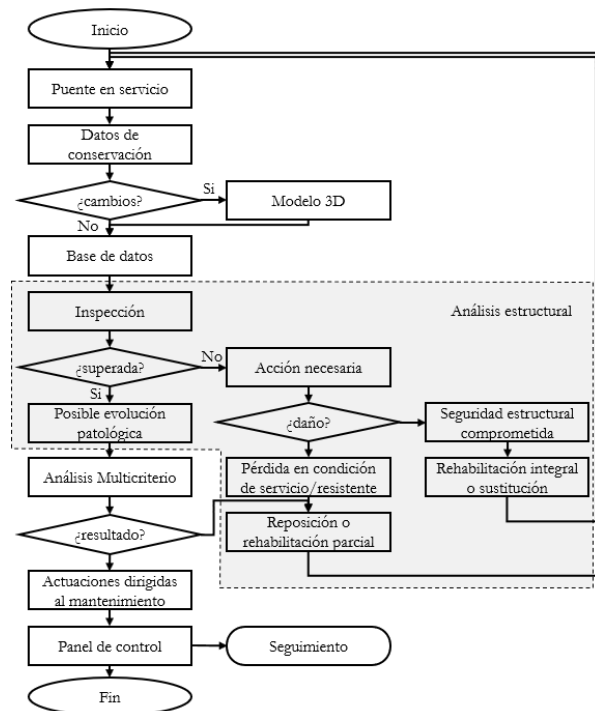


Figura 1. Diagrama de flujo propuesto en la toma de decisiones.

2.1 Construcción del modelo

La adopción de la metodología BIM en la gestión de infraestructuras facilita un mayor control de sobre los datos disponibles. La construcción de un modelo de una estructura existente puede ser un proceso complejo en función de la información disponible y esta será relevante para conseguir un mayor o menor nivel de detalle (LOD, por sus siglas en inglés). Sin embargo, Un buen modelo de la estructura puede ofrecer una visión global de esta, o particularizada para cada uno de sus elementos, y canalizar todos los datos convirtiéndose en un repositorio de información [7]. Para ello es fundamental establecer una relación robusta entre el modelo y la base de datos utilizada para su gestión [8]. Para este estudio, el desarrollo del modelo virtual es independiente de la aplicación utilizada, partiendo de un modelo estandarizado.

2.2 Análisis multicriterio objetivado

El mantenimiento de este tipo de estructuras se encuentra regulado y se basa en inspecciones rutinarias que determinan su estado de conservación [9]. Sin embargo, dentro de la gestión del puente deben de considerarse otros parámetros que permitan un análisis más profundo de la situación y anticipar la mejor estrategia de conservación. Por ello se plantea la utilización de un análisis multicriterio que complemente y enriquezca la información disponible en términos de sostenibilidad [10]. A partir de requisitos sociales, medioambientales y económicos, se evalúan y ponderan de manera objetivada para diferentes escenarios de conservación previstos, siempre que el índice de deterioro de la estructura lo permita. El índice de valor para cada escenario i se calcula como la suma ponderada del valor v_{ij} para cada uno de los indicadores j propuestos, mediante la fórmula:

$$\text{Índice de valor}_i = \sum v_{ij} \times p_j \quad (1)$$

El mayor de los desafíos en este tipo de análisis es determinar qué criterios son relevantes para el

análisis y debe consensuarse en un panel de expertos. Por otro lado, para la determinación de los pesos p_j se ha optado por un modelo matemático para reducir la incertidumbre e influencia del decisor en el análisis multicriterio [11]. El modelo adoptado es el Método de la Entropía de Shannon [12]. Cuanto menor sea el valor de la entropía más información nos proporcionará sobre la alternativa en relación con las demás, y por tanto debe otorgarse un mayor peso [13]. Este método de asignación de pesos ha sido utilizado en problemas de decisión de diferentes índoles [14], [15], [16]. El proceso y formulación matemático utilizado es el siguiente:

1. Valores normalizados de los valores de cada alternativa para cada indicador, v_{ij} , teniendo en cuenta si el indicador es índice de beneficio o de coste [17]:

$$s_{ij} = \begin{cases} \frac{v_{ij} - \min(v_{ij})}{\max(v_{ij}) - \min(v_{ij})}, & \text{indicador de beneficio} \\ \frac{\max(v_{ij}) - v_{ij}}{\max(v_{ij}) - \min(v_{ij})}, & \text{indicador de coste} \end{cases} \quad (2)$$

donde v_{ij} es el valor de la alternativa i para el indicador j , m es el número total de alternativas y $s_{ij} \in [0, 1]$. Se calcula, x_{ij} :

$$x_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sum_{i=1}^m s_{ij}} \quad (3)$$

2. Se calcula el valor de entropía e_j para cada indicadore j , de la siguiente forma:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(x_{ij}) = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \ln(x_{ij}) \quad (4)$$

Con la condición de que si $x_{ij} = 0$, entonces $\ln(x_{ij}) = 0$,

3. Se calcula el grado de desviación d_j , para cada indicador j :

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

1. Se calcula el peso p_j a asignar a cada criterio j como

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (6)$$

donde n es el número de indicadores.

2.3 Acceso y visualización de resultados

El acceso a la información es igual de relevante en la gestión de la estructura. La utilización de estándares permite la utilización del modelo virtual fuera de aplicaciones específicas del modelado BIM, así como la adopción de una base de datos robusta permite el desarrollo de un panel de control utilizable desde cualquier dispositivo y por personal sin formación en este tipo de herramientas BIM. Este panel de control debe satisfacer las necesidades particulares para cada caso [18]. En esta investigación se ha optado por una versión simplificada del proceso, utilizándose una hoja de cálculo para en análisis multicriterio y una herramienta de análisis de datos y visualización para la elaboración del panel de control interactivo con el modelo virtual.

3. Resultados

3.1 Implementación del modelo

3.1.1. Modelo virtual

El estudio de caso se ha realizado sobre una de las estrucutras de la autopista Madrid-Calle 30 sobre el río Manzanares. Se trata de un puente de vigas prefabricadas de 3 vanos de 30 m cada uno que da servicio a las dos calzadas de ambos sentidos, de 3 carriles cada uno más un carril de deceleración en la calzada interior en el p.k. 20+800. La figura 2 muestra su modelo virtual.

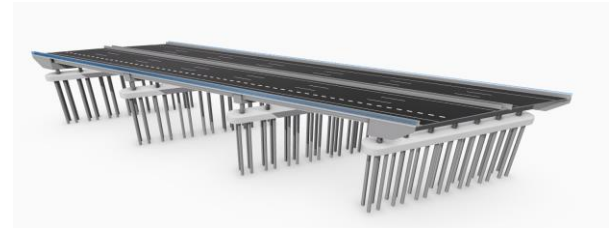


Figura 2. Modelo virtual del puente de Calle 30 sobre el río Manzanares p.k. 20+800.

El modelo se ha desarrollado a partir de los datos de la empresa gestora de la carretera, nube de puntos e inspecciones visuales con un nivel de

detalle LOD200. Este modelo se ha exportado al formato estandarizado IFC. El modelo virtual permite la segregación de cada uno de los elementos que conforman el puente siendo necesario establecer un nexo entre cada objeto del modelo y su información asociada. Este nexo se realiza mediante la identificación (ID) unívoca de cada elemento utilizándose el código alfanumérico utilizado en la gestión de esta carretera. Del modelo virtual se han extraído algunos parámetros geométricos como el tipo de elemento o cantidades. El resto de información relevante para su conservación, como el estado de deterioro, los costes de mantenimiento o rehabilitación dependerán del instante del LCA en que se evalúe, por lo que estos datos no se volcarán al modelo virtual pudiéndose actualizar en cada momento a través del panel de control o su base de datos.

3.1.2. Análisis multicriterio

Entre los requisitos de sostenibilidad se han definido los 10 indicadores de la tabla 1. Al tratarse de un caso de estudio y no ser el objeto de esta investigación se ha optado por este número reducido de indicadores. El método propuesto admite la definición de nuevos indicadores permitiendo escalar el análisis hasta el umbral de aceptación que sea necesario. Estos indicadores deben ser relevantes para la gestión del puente y se pueden consensuar por consultas interdisciplinaria o de manera anónima por el método Delphi [19].

Tabla 1. Indicadores propuestos para el análisis.

Requisito	Indicador
-----------	-----------

Social	Seguridad estructural Tiempo perdido por conservación Probabilidad de corte total Afecciones a la conducción
Medioambiente	Consumo de material Afecciones al río
Económico	Costes de mantenimiento Costes de rehabilitación Tiempo de ejecución Vida útil estimada

Se definen tres escenarios previstos para el análisis multicriterio:

- Mantenimiento ordinario sin acciones.
- Reposición o rehabilitación parcial.
- Rehabilitación integral o sustitución.

En función de los valores v_{ij} el análisis multicriterio se actualiza para los tres escenarios posibles. Este análisis se puede realizar de toda la estructura completa o particularizarlo para cada elemento del puente. Los valores v_{ij} se toman de la base de datos por lo que permite realizar un análisis actualizado en función del momento del LCA en que se está realizando. Algunos valores, como los costes de mantenimiento y rehabilitación se han obtenido de bases de precios oficiales como la del Ayuntamiento de Madrid y datos proporcionados por la empresa gestora. Para otros criterios como afecciones a la conducción o al río se ha utilizado una valoración por parte de expertos.

3.1.3. Panel de control

El panel de control se ha realizado mediante la aplicación Power BI, utilizándose un visor para modelos BIM y diferentes objetos visuales para segmentar la información disponible por zonas y elementos del puente. Como ejemplo práctico se ha desarrollado una hoja de cálculo como base de datos en donde se establece un inventario de todos los elementos que componen el puente en el modelo virtual. A esta base de datos se le ha añadido información asociada a la conservación como cantidades, extraídos del modelo virtual, materiales, resultados de inspecciones a lo largo del tiempo o costes de mantenimiento y

reposición para cada objeto. La figura 3 muestra una captura de este panel de control. Como ejemplo, se muestra el estado de deterioro calculado según la normativa para cada uno de los elementos estudiados. Debido a la utilización

del modelo IFC ha sido necesario establecer un nuevo campo con el identificador único IFCguid que se genera para este formato de datos estandarizado y poder relacionar los objetos del modelo virtual con sus datos de conservación.

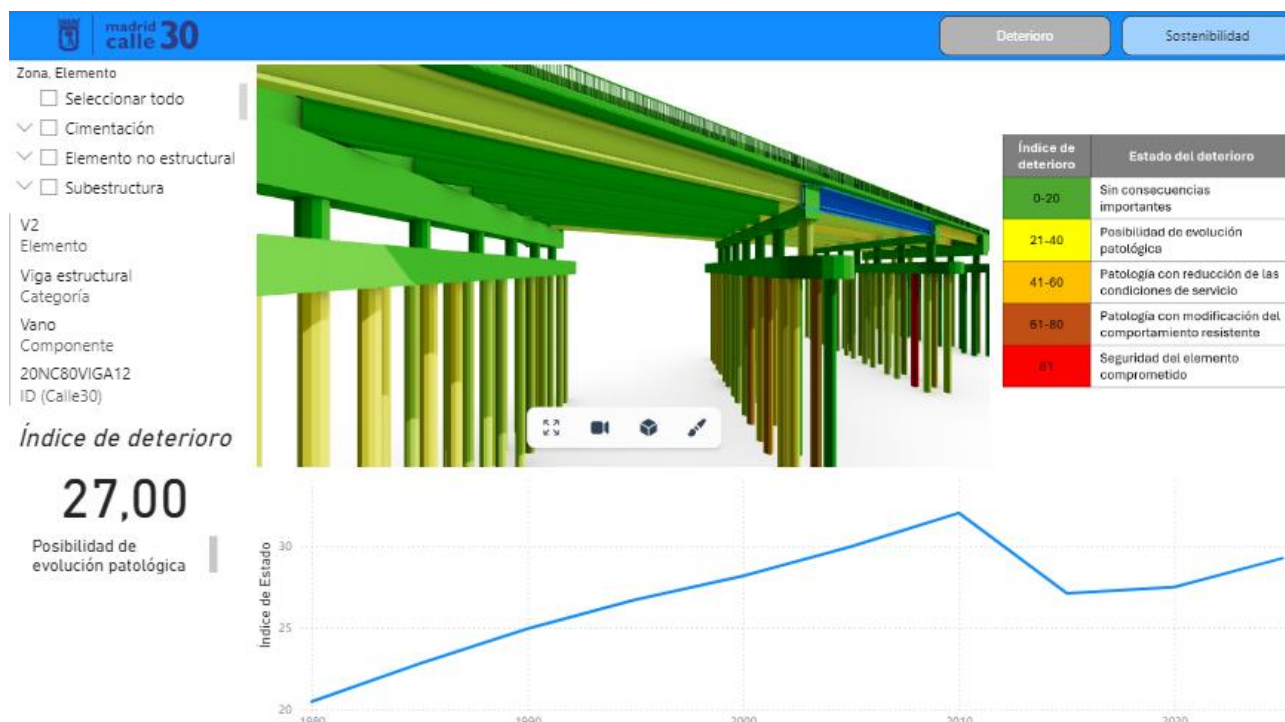


Figura 1. Captura del panel de control interactivo para la gestión del puente.

4. Discusión

La conservación de una estructura requiere de un buen conocimiento de su estado. La aplicación de la metodología BIM puede ser un buen canalizador de la información. Su modelo virtual y la información que se asocia a cada uno de los elementos pueden ayudar a establecer las estrategias de conservación y alargar el desempeño de la estructura prolongando su vida útil con los recursos existentes. A la hora de definir esas estrategias de conservación resulta imprescindible disponer de la mayor cantidad de datos disponibles. Un análisis multicriterio de estos datos permite una toma de decisiones más eficiente y completa para ayudar preservar el estado de la estructura y anticiparse al desarrollo de patologías que reduzcan sus condiciones de servicio o produzcan una modificación de su

comportamiento resistente. El control de una estructura a través de un modelo virtual no requiere de un gran nivel de detalle, pudiéndose realizar un seguimiento suficiente con LOD bajos que permiten un mejor rendimiento de las aplicaciones utilizadas. Además, conseguir un modelo virtual exacto puede ser costoso y requerir de información de proyecto que puede no estar disponible para el gran parque de estructuras existentes.

En materia de conservación y explotación, la información asociada es el dato que realmente va a conseguir una mejora en su gestión. La utilización de un método multicriterio objetivado como el método de la entropía permite independizar los resultados del análisis de los pesos otorgados a cada indicador. Con ello se reduce la incertidumbre asociada a cada criterios y se potencian aquellos criterios que aportan más información distintiva, identificando cuáles de estos criterios tiene

mayor relevancia en el resultado final. Este tipo de análisis es flexible y adaptable a cada momento, tanto por los escenarios planteados como por los indicadores utilizados. Por ello es una herramienta útil para la gestión de una estructura, en donde las necesidades de conservación varían a lo largo de su LCA. Además, la utilización de la base de datos ajena al modelo BIM y como origen de datos para el análisis multicriterio permite la utilización de otras tecnologías de la información y analítica avanzada como la inteligencia artificial con el fin de potenciar y enriquecer el proceso de toma de decisiones.

Los indicadores utilizados en este caso de estudio han sido seleccionados en función de la información disponible para este puente concreto. La utilización de este proceso decisor en otros puentes debe escalarse a un número de indicadores suficiente para la validación de los resultados. No obstante, la utilización del modelo matemático de la entropía permite esta escalabilidad.

Finalmente, el panel de control desarrollado aporta una visión global del estado de la estructura, segmentar la información por elemento o el volcado de los resultados del análisis multicriterio sobre el modelo virtual, sin la utilización de aplicaciones propias al modelado BIM.

5. Conclusiones

La conservación de estructuras requiere de un conocimiento profundo de su estado. El empleo de la metodología BIM y un análisis multicriterio que incluya parámetros de sostenibilidad además de los criterios de comportamiento estructural permite establecer una visión global de la estructura y pormenorizarlo a cada uno de los elementos que la componen. Este análisis objetivado y cuyos resultados sean accesibles desde cualquier dispositivo a través de un panel de control puede ayudar a mejorar la eficiencia en la toma de decisiones, anticipando las estrategias

de conservación más adecuadas para una gestión sostenible del patrimonio existente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Madrid Calle 30 por el apoyo a la Cátedra Universitaria de Empresa Madrid Calle 30-UPM

Referencias

- [1] R. Maskuriy, A. Selamat, P. Maresova, O. Krejcar, and O. O. David, Industry 4.0 for the Construction Industry: Review of Management Perspective, *Economies*. Vol. 7, no. 3 (2019) 68.
- [2] D. Kazado, M. Kavgić, and R. Eskicioglu, Integrating Building Information Modeling (BIM) and sensor technology for Facility Management, *Journal of Information Technology in Construction*. Vol. 24, no. 23 (2024) 440-458.
- [3] G. Nota, D. Peluso, and A. T. Lazo, The contribution of Industry 4.0 technologies to facility management, *International Journal of Engineering Business Management*. Vol. 13 (2021) 1–14.
- [4] D. C. Nguyen, T. Q. Nguyen, R. Jin, C. H. Jeon, and C. S. Shim, BIM-based mixed-reality application for bridge inspection and maintenance, *Construction Innovation*. Vol. 22, no. 3 (2022) 487–503.
- [5] P. Singh and A. Sadhu, System Identification -Enhanced Visualization Tool for Infrastructure Monitoring and Maintenance, *Front Built Environ*. Vol. 0 (2020) 76.
- [6] . Xu and Y. Turkan, BrIM and UAS for bridge inspections and management, *Engineering, Construction and Architectural Management*. Vol. 27, no. 3 (2019) 785–807.
- [7] P. Coates, A. Haidar, S. Jaradat, L. Pinti, R. Codinhoto, and S. Bonelli, A Review of

- Building Information Modelling (BIM) for Facility Management (FM): Implementation in Public Organisations, *Applied Sciences*. Vol. 12, no. 3 (2022) 1540.
- [8] J. J. Cepa, R. Muñoz Pavón, M. G. Alberti, and P. Caramés, Towards BIM-GIS integration for road intelligent management system, *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. 29, no. 7 (2023) 621–638.
- [9] Dirección General de Carreteras, Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado, Ministerio de Fomento, Madrid, 2012.
- [10] F. Lozano, J. C. Jurado, J. A. Lozano - Galant, A. de la Fuente, and J. Turmo, Integration of BIM and Value Model for Sustainability Assessment for application in bridge projects, *Automation in Construction*. Vol. 152 (2023) 104935.
- [11] M. B. Muñoz Medina, Metodología para el análisis y selección sostenible de alternativas en infraestructuras mediante la aplicación de métodos de decisión multicriterio con criterios en conflicto y en condiciones de incertidumbre, Universidad de Granada, España, 2022.
- [12] C. E. Shannon, A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Technical Journal*. Vol. 27, no. 3 (1948) 379 – 423.
- [13] J. Ye, Fuzzy decision-making method based on the weighted correlation coefficient under intuitionistic fuzzy environment, *European Journal of Operational Research*. Vol. 205, no. 1 (2010) 202–204.
- [14] N. Deepa and K. Ganesan, Multi-class classification using hybrid soft decision model for agriculture crop selection, *Neural Computing and Applications*. Vol. 30, no. 4 (2018) 1025 – 1038.
- [15] Y. Wu et al., Location selection of seawater pumped hydro storage station in China based on multi-attribute decision making, *Renew Energy*. Vol. 139 (2019) 410 – 425.
- [16] H. Zhao, H. Zhao, and S. Guo, Comprehensive Performance Evaluation of Electricity Grid Corporations Employing a Novel MCDM Model, *Sustainability*. Vol. 10, no. 7 (2018) 2130.
- [17] Y. M. Wang and Y. Luo, On rank reversal in decision analysis, *Mathematical and Computer Modelling*. Vol. 49, no. 5–6 (2009) 1221–1229.
- [18] R. M. Pavón, M. G. Alberti, A. A. A. Álvarez, and J. J. Cepa, Bim-based Digital Twin development for university Campus management. Case study ETSICCP, *Expert Systems with Applications*. Vol. 262 (2025) 125696.
- [19] S. Seyis, Mixed method review for integrating building information modeling and life-cycle assessments, *Building and Environment*. Vol. 173 (2020) 106703.