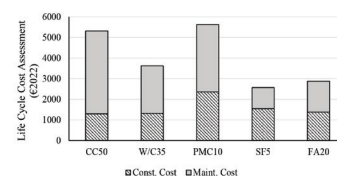


# Mejora de la evaluación de la sostenibilidad de puentes en entornos agresivos mediante la decisión grupal multicriterio



## Enhancing sustainability assessment of bridges in aggressive environments through multi-criteria group decision-making



Ignacio J. Navarro<sup>1</sup>, José V. Martí<sup>1,2</sup>, Víctor Yepes<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia (España)

<sup>2</sup> ICITECH-Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, s/n. 46022 Valencia (España)

DOI: <https://doi.org/10.6036/10816> | Recibido: 05/ene/2023 • Inicio Evaluación: 05/ene/2023 • Aceptado: 01/mar/2023

To cite this article: NAVARRO, Ignacio; MARTÍ, José V.; YEPES, Víctor. ENHANCING SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF BRIDGES IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS THROUGH MULTI-CRITERIA GROUP DECISION-MAKING. DYNA. September 2023. Vol. 98, n.5, pp. 477-483. DOI: <https://dx.doi.org/10.6036/10816>

### FINANCIACIÓN

Subvención PID2020-117056RB-I00 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por "ERDF A way of making Europe".

### ABSTRACT

- The construction industry is increasingly recognized as critical in achieving Sustainable Development Goals. Construction activities and infrastructure have both beneficial and non-beneficial impacts, making infrastructure design a focal point of current research investigating how best to contribute to sustainability as society demands. Although methods exist to assess infrastructures' economic, environmental, and social life cycle, the challenge remains in combining these dimensions into a single holistic indicator to facilitate decision-making. This study applies four decision-making techniques (ANP, TOPSIS, COPRAS, and VIKOR) to evaluate five different design alternatives for a concrete bridge exposed to a coastal environment. The results indicate that concretes containing even small amounts of silica fume perform better over their life cycle than other solutions usually considered to increase durability, such as water/cement ratio reduction or concrete cover increase.
- Keywords:** sustainable design, bridges, life cycle assessment, Analytic Network Process, TOPSIS, VIKOR, COPRAS, Multi-criteria decision-making.

### RESUMEN

Cada vez es más evidente que el sector de la construcción desempeña un papel fundamental en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Las actividades y la infraestructura relacionadas con la construcción tienen efectos tanto positivos como negativos, lo que hace que el diseño de infraestructuras sea uno de los puntos clave de la investigación actual en torno a la mejor manera de contribuir a la sostenibilidad, tal como lo demanda la sociedad. Aunque existen métodos para evaluar el ciclo de vida económico, medioambiental y social de las infraestructuras, el reto sigue siendo combinar estas dimensiones en un único indicador holístico que facilite la toma de decisiones. Este estudio aplica cuatro técnicas de toma de decisiones (ANP, TOPSIS, COPRAS y VIKOR) para evaluar cinco alternativas de diseño diferentes para

un puente de hormigón expuesto a un entorno costero. Los resultados indican que los hormigones que contienen incluso pequeñas cantidades de humo de sílice se comportan mejor durante su ciclo de vida que otras soluciones habitualmente consideradas para aumentar la durabilidad, como la reducción de la relación agua/cemento o el aumento del recubrimiento de hormigón.

**Palabras Clave:** diseño sostenible, puentes, evaluación del ciclo de vida, Proceso Analítico Jerárquico, TOPSIS, VIKOR, COPRAS, toma de decisiones multicriterio.

### 1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad se ha convertido en un tema central tanto para el sector público como para el privado, desde que se establecieron los Objetivos de Desarrollo Sostenible en 2015. La sociedad ha tomado medidas concretas para implementar estos objetivos, como el ambicioso Pacto Verde Europeo, el cual tiene como objetivo hacer que Europa sea climáticamente neutra en 2050. Este pacto se enfoca en promover iniciativas asociadas a la economía circular. El sector de la construcción es fundamental para alcanzar este objetivo, ya que es responsable de un impacto medioambiental negativo significativo. Se calcula que sólo la producción de cemento contribuye aproximadamente al 10% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [1]. En consecuencia, la optimización del diseño de infraestructuras para reducir su impacto económico o medioambiental está en el punto de mira de muchos investigadores, cuyos trabajos se centran en una amplia variedad de infraestructuras como puentes [2], edificios [3], muros de contención de tierras [4] o pavimentos [5], entre muchas otras. También destaca la evaluación de distintas estrategias de mantenimiento para reducir la respuesta a lo largo del ciclo de vida de las infraestructuras [6]. Las instituciones públicas insisten cada vez más en la necesidad de diseñar infraestructuras y edificios sostenibles, abogando por un consumo responsable de las materias primas y utilizando materiales de construcción con baja energía incorporada y baja huella de carbono. Este énfasis se está reflejando también en las ayudas autonómicas y estatales a proyectos con un enfoque directamente sostenible, en la exigencia del cumplimiento de requisitos ambientales y sociales específicos en las licitaciones de proyectos públicos de todo tipo, la exigencia de niveles de certificación cada vez más exigentes (ENVISION, LEEDs, BREEAM, ...), y otros [7].

La sociedad suele abordar los problemas de sostenibilidad siguiendo un reduccionismo ecológico, mientras que los problemas de sostenibilidad tienen un carácter multidimensional y su evaluación requiere una "orquestación de las ciencias" [8]. Para lograr este enfoque multidisciplinar de la evaluación de la sostenibilidad, las técnicas de toma de decisión multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) son una herramienta muy eficaz [9]. En este contexto, en los últimos años se ha investigado para desarrollar herramientas y métodos que permitan evaluar la sostenibilidad de las infraestructuras y extraer conclusiones relevantes para orientar futuras acciones de diseño en diversas estructuras, aplicando para ello una amplia variedad de técnicas de MCDM. Sin embargo, aún no se ha llegado a un consenso sobre el método MCDM que debe centrarse en la evaluación de infraestructuras sostenibles. Por el contrario, algunos autores afirman que las conclusiones de la evaluación de la sostenibilidad deberían ser el resultado de aplicar varias técnicas MCDM [10].

El objetivo de este trabajo es evaluar la sostenibilidad del ciclo de vida de cinco alternativas de diseño para un puente de hormigón en una región costera. Se ha comprobado la solidez de los resultados frente a distintos métodos MCDM aplicando cuatro técnicas multicriterio, a saber, el Proceso Analítico en Red (ANP), TOPSIS, VIKOR y COPRAS. Para la aplicación de estas técnicas de toma de decisión se cuenta con la participación de tres expertos. La evaluación de la sostenibilidad tiene en cuenta un conjunto de 9 criterios cuantitativos que abarcan las tres dimensiones de la sostenibilidad: economía, medio ambiente y sociedad. El documento está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 describe las cuatro técnicas MCDM utilizadas en la evaluación. La Sección 3 presenta el caso de estudio, las alternativas de diseño y las hipótesis consideradas para su evaluación del ciclo de vida. La Sección 4 muestra los principales resultados del estudio, y la Sección 5 resume las conclusiones obtenidas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. TOPSIS

El método TOPSIS (que significa Técnica de Orden de Preferencia por Similitud a la Solución Ideal) fue definido por primera vez por Yoon y Hwang [11] en 1981 y se ha convertido en uno de los métodos de toma de decisiones multicriterio más populares utilizados en problemas de decisión en ingeniería civil [12]. Por citar algunos ejemplos, la técnica TOPSIS se ha aplicado recientemente para evaluar los impactos relacionados con la sostenibilidad asociados a determinados métodos de construcción de puentes [13] o edificios [3]. Marzouk y Sabbah [14] utilizaron esta técnica para integrar criterios de sostenibilidad social en la selección de proveedores a lo largo de la cadena de suministro de la construcción.

La aplicación de la técnica TOPSIS comienza con la construcción de la matriz de decisión  $R = [r_{ij}]$  y la determinación de la relevancia  $w_i$  de cada criterio  $i$  implicado en el problema. Para ello se suele utilizar el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) [15]. Se observará que, mientras que las relevancias  $w_i$  son valores relativos que van de 0 a 1 y deben sumar 1, los elementos de la matriz de decisión  $R$  se miden en términos de cada criterio (por ejemplo, emisiones equivalentes de CO2 a la atmósfera, ...). En consecuencia, los valores incluidos en la matriz de decisión  $R$  deben normalizarse como:

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n r_{ij}^2}} \quad (1)$$

donde  $n$  es el número de criterios implicados en el problema. Entonces la matriz de decisión normalizada se pondera de la siguiente manera:

$$v_{ij} = w_i \cdot r'_{ij} \quad (2)$$

donde  $w_i$  es el peso del criterio  $i^{\text{th}}$ ; ahora, se obtienen las denominadas soluciones ideales positiva y negativa ( $SIP$  y  $SIN$ , respectivamente) para cada criterio. Para el caso de la  $SIP$ , se trata de dos alternativas hipotéticas construidas combinando las mejores puntuaciones para cada criterio considerando todas las alternativas implicadas en el proceso de toma de decisiones y al revés para la  $SIN$ . A continuación, se calcula la distancia euclidiana de cada alternativa al  $SIP$  y al  $SIN$  de la siguiente manera:

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2} \quad (3)$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2} \quad (4)$$

donde  $v_i^+$  y  $v_i^-$  son los componentes del  $SIP$  y del  $SIN$ , respectivamente,  $d_j^+$  y  $d_j^-$  son las distancias euclídeas de la alternativa  $j$  al  $SIP$  y al  $SIN$ , respectivamente. Por último, se calcula un índice de proximidad  $Q_j$  para evaluar la distancia relativa de cada alternativa  $j$  al  $SIP$  como:

$$Q_j = \frac{d_j^-}{d_j^- + d_j^+} \quad (5)$$

Según la técnica TOPSIS, la mejor solución será la que tenga el mayor índice de proximidad  $Q_j$ .

### 2.2. VIKOR

La técnica VlseKriterijuska Optimizacija I Komoromisno Resenje (VIKOR) es una técnica MCDM ampliamente utilizada y desarrollada por Opricovic [16] para ayudar en la toma de decisiones en problemas que implican criterios contradictorios. En lo que respecta a los problemas de ingeniería relacionados con la sostenibilidad, VIKOR se ha utilizado recientemente para evaluar puentes con luces de vano reducidas [17] o dos puentes bajo un enfoque de lógica difusa [18]. García-Segura et al. [19] aplicaron un enfoque combinado AHP-VIKOR para evaluar y optimizar la sostenibilidad de los diseños de puentes.

El primer paso para aplicar VIKOR consiste en construir la matriz de decisión  $R = [r_{ij}]$  y determinar las ponderaciones de los criterios  $w_i$ . A continuación, deben determinarse los mejores y peores valores de todas las funciones de criterio, es decir,  $r_i^+$  y  $r_i^-$ . Después, la matriz de decisión  $R$  se normaliza del siguiente modo:

$$r'_{ij} = \frac{r_i^+ - r_{ij}}{r_i^+ - r_i^-} \quad (6)$$

A continuación, la distancia ponderada y normalizada Manhattan  $S_j$  y la distancia ponderada y normalizada Chebyshev  $R_j$  de cada alternativa  $j$  se calculan como:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r'_{ij} \quad (7)$$

$$R_j = \max\{w_i \cdot r'_{ij}\} \quad (8)$$

El último paso consiste en evaluar un índice de medida VIKOR  $Q_j$  para cada alternativa  $j$ , que se calcula como:

$$Q_j = v \cdot \frac{S_j - \min\{S_j\}}{\max\{S_j\} - \min\{S_j\}} + (1 - v) \cdot \frac{R_j - \min\{R_j\}}{\max\{R_j\} - \min\{R_j\}} \quad (9)$$

Donde  $v$  es un factor estratégico que determina la relevancia de las dos métricas de distancia. Normalmente, ambas métricas se comprometen fijando  $v = 0.5$ , que es el enfoque adoptado en esta investigación. Según esta técnica, la mejor alternativa obtiene la mayor puntuación  $Q_j$ , siempre que la diferencia con la puntuación  $Q$  de la segunda mejor alternativa sea superior a  $1/(j-1)$ .

### 2.3. COPRAS

El método COPRAS (Complex Proportional Assessment) fue definido por primera vez por Zavadskas [20] como una forma de superar una de las principales desventajas del método MCDM Simple Additive Weighting (SAW), a saber, el hecho de que sólo puede trabajar con atributos maximizadores. Dada su sencillez y facilidad de aplicación [21], [22], el método COPRAS se ha utilizado en varios problemas de toma de decisiones relacionados con la sostenibilidad. Invidiata et al. [23] aplicaron con éxito COPRAS para evaluar la sostenibilidad de las estrategias de diseño de edificios. La técnica COPRAS también se ha utilizado para evaluar la sostenibilidad de varios proyectos de construcción [24], [25].

Como es habitual en otras técnicas MCDM, el método COPRAS requiere iniciar la construcción de la matriz de decisión del problema  $R = [r_{ij}]$  y determinar las ponderaciones de los criterios  $w_i$ . A continuación, la matriz de decisión se normaliza como:

$$r'_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (10)$$

A continuación, la matriz de decisión normalizada  $R'$  se pondera del siguiente modo:

$$v_{ij} = w_i \cdot r'_{ij} \quad (11)$$

Después, la suma de las puntuaciones normalizadas ponderadas para los criterios de beneficios y costes asociados a cada alternativa  $j$  se calculan por separado como:

$$S_{+j} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r'_{ij,+} \quad (12)$$

$$S_{-j} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot r'_{ij,-} \quad (13)$$

donde  $r'_{ij,+}$  y  $r'_{ij,-}$  son puntuaciones normalizadas para los criterios de tipo beneficio y tipo coste, respectivamente. A continuación, la prioridad relativa  $Q_j$  de cada alternativa  $j$  se calcula como:

$$Q_j = S_{+j} + \frac{\sum_{k=1}^m S_{-k}}{S_{-j} \cdot \sum_{k=1}^m S_{-k}} \quad (14)$$

donde  $m$  es el número total de alternativas implicadas en el problema de toma de decisión. La mejor alternativa, según COPRAS, es la que da como resultado el mayor valor del índice  $Q_j$ .

### 2.4. PROCESO ANALÍTICO EN RED (ANP)

El Proceso Analítico en Red fue formulado por primera vez por Saaty [26] como una generalización de la técnica de toma de decisiones AHP, ampliamente utilizada. El método ANP permite considerar relaciones complejas entre criterios y alternativas, lo que da

lugar a una modelización más precisa de los problemas complejos de la vida real. El ANP también se ha utilizado ampliamente en el contexto del diseño sostenible de infraestructuras de diversos tipos. Ignatius et al. [27] aplicaron ANP para evaluar edificios ecológicos siguiendo un enfoque de lógica difusa. Dehdasht et al. [28] propusieron una metodología híbrida DEMATEL-ANP para la evaluación de riesgos en proyectos de construcción de petróleo y gas. Recientemente también se ha utilizado ANP para seleccionar materiales para proyectos de construcción teniendo en cuenta criterios de decisión sostenibles [29]. Navarro et al. [30] también aplicaron ANP para la evaluación del ciclo de vida de diferentes alternativas de diseño para puentes de hormigón cerca de la costa.

El primer paso del método ANP consiste en construir el modelo de red del problema de toma de decisiones que se va a evaluar. Las alternativas y los criterios se agrupan primero en clusters que contienen elementos con propiedades comunes. A continuación, se definen las relaciones entre los elementos identificándolos y reflejándolos en una supermatriz de influencia  $A$ . Las relaciones que pueden existir entre los elementos de la red (criterios y alternativas) pueden ser unidireccionales o bidireccionales, lo que significa que dos elementos conectados pueden influirse mutuamente, o sólo uno puede influir en el otro, pero no a la inversa. Así, si un elemento  $i$  está influido por un elemento  $j$ , entonces  $a_{ji} = 1$ , si no,  $a_{ji} = 0$ . Obsérvese que la supermatriz  $A$  no es necesariamente simétrica.

Una vez modelizada la red como la supermatriz influyente  $A$ , es necesario cuantificar las influencias identificadas con un 1. Esto suele hacerse aplicando la técnica AHP para determinar la relevancia de dichas relaciones. Cabe señalar que el AHP se aplica cluster por cluster, considerando únicamente los elementos distintos de cero. Después, la supermatriz resultante se ponderará para hacerla estocástica, es decir, para que las columnas sumen 1.

Esta supermatriz ponderada se potenciará tantas veces como sea necesario para que cada columna sea idéntica. La matriz resultante se denomina supermatriz limitadora. Cada una de las columnas contiene las ponderaciones relativas resultantes de los criterios implicados y la puntuación de cada una de las alternativas analizadas.

### 2.5. TÉCNICA DE AGREGACIÓN DE GRUPO

Para tener en cuenta las preferencias de los distintos responsables de la toma de decisiones (DM) en un determinado problema de toma de decisiones, es necesario asignar a cada DM un determinado peso de voto. Esta estrategia de agregación pretende asignar a cada uno de ellos una relevancia o peso de voto en función de sus capacidades o experiencia en el ámbito a evaluar [31]. Calcular el poder de voto de los DM implicados en el problema de toma de decisiones no es sencillo, y pueden seguirse varios enfoques. En este caso, la relevancia del voto de cada DM se obtiene a partir de un enfoque neutrosófico [32]. Esta técnica permite tener en cuenta aspectos relacionados no sólo con la experiencia del gestor en diferentes campos, sino también con sus incoherencias o incertidumbres a la hora de emitir juicios durante el proceso de toma de decisiones. Se considera que la experiencia del DM está directamente relacionada con su credibilidad  $\delta_i$ , y puede obtenerse como:

$$\delta_i = \left( \frac{N_i}{\max_{k=1 \dots p} \{N_k\}} + \sum_n K_{c,i} \right) / (n + 1) \quad (15)$$

donde  $p$  representa el número de decisores implicados en el proceso,  $N_k$  representa los años de experiencia del decisor  $k$ , y  $K_{c,i}$  es un conjunto de  $n$  coeficientes que van de 0 a 1 y que representan el nivel de conocimientos del experto  $i$  en diferentes campos

de especialización relacionados con la decisión que se va a tomar. En esta investigación relacionada con la sostenibilidad, se consideran relevantes cuatro campos de especialización: el análisis económico, las cuestiones medioambientales y sociales y el diseño estructural.

Las incertidumbres de cada DM se contabilizan mediante la denominada indeterminación del experto  $\theta_i$ :

$$\theta_i = \sum_{q,r=1\dots n} (1 - SC_{q,r}^i) / J^2$$

(16)

donde  $J$  es el número de juicios emitidos a lo largo del proceso o subproceso de toma de decisiones, y  $SC_{q,r}^i$  es la certidumbre expresada por el DM  $i$  al comparar los elementos  $q$  y  $r$  en cada matriz de comparación rellenada a lo largo del proceso de toma de decisiones.

El último término neutrosófico que permite determinar el poder de voto de cada experto representa sus inconsistencias a lo largo del proceso. Se mide como:

$$\varepsilon_i = \sum (CR_m^i / CR_{lim,m}) / M_i$$

(17)

donde  $CR_m^i$  es el ratio de consistencia AHP del experto  $i$  al rellenar la matriz de comparación  $m$ , y  $CR_{lim,m}$  es el ratio de consistencia límite para el número de criterios comparados en la matriz  $m$ . Finalmente, el poder de voto del experto  $i$  se determina como [33]:

$$\varphi_i = \frac{1 - \sqrt{\{(1 - \delta_i)^2 + \theta_i^2 + \varepsilon_i^2\} / 3}}{\sum_{k=1}^p \left( 1 - \sqrt{\{(1 - \delta_k)^2 + \theta_k^2 + \varepsilon_k^2\} / 3} \right)}$$

(18)

3. ESTUDIO DE CASO

Las metodologías de toma de decisión descritas se aplican para evaluar la sostenibilidad del ciclo de vida de distintas alternativas de diseño para un mismo puente de hormigón expuesto a un entorno costero. La unidad funcional del análisis consiste en un tablero de hormigón en viga cajón de 1 m de longitud y 12 m de anchura, al que se exige una vida útil de 100 años. Las cinco alternativas de diseño aquí consideradas pretenden aumentar la durabilidad respecto a un diseño convencional. Para ello, la primera alternativa estudiada consiste en un diseño convencional de hormigón con un recubrimiento geométrico de hormigón de 50 mm (esta alternativa se denominará CC50 en lo sucesivo). La segunda alternativa es un diseño convencional con una relación agua-cemento reducida (alternativa W/C35 en adelante) para evitar la entrada de cloruros. La tercera alternativa consiste en un diseño que contiene hormigón modificado con polímeros (PMC10

| Alternativa              | CC50 | W/C35 | PMC10 | FA20 | SF5  |
|--------------------------|------|-------|-------|------|------|
| Cemento (kg/m³)          | 350  | 350   | 350   | 329  | 315  |
| Agua (l/m³)              | 140  | 122   | 140   | 140  | 140  |
| Grava (kg/m³)            | 1017 | 1037  | 1017  | 1017 | 1017 |
| Arena (kg/m³)            | 1068 | 1095  | 1068  | 1086 | 1098 |
| Humo de sílice (kg/m³)   | -    | -     | -     | -    | 17.5 |
| Cenizas volantes (kg/m³) | -    | -     | -     | 70   | -    |
| Plastificante (kg/m³)    | 5.25 | 7     | -     | 4.94 | -    |
| Látex (kg/m³)            | -    | -     | 35    | -    | -    |
| Recubrimiento (mm)       | 50   | 40    | 40    | 40   | 40   |

Tabla 1: Definición de cada alternativa de diseño.

| Alternativa                                                                      | CC50           | W/C35          | PMC10          | FA20           | SF5            |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $D_o$ ( $\times 10^{-12}$ m²/s)                                                  | 8.90<br>(0.90) | 5.80<br>(0.47) | 6.51<br>(0.55) | 4.65<br>(0.35) | 2.94<br>(0.23) |
| $C_{cr}$ (%)                                                                     | 0.60<br>(0.10) | 0.60<br>(0.10) | 0.60<br>(0.10) | 0.60<br>(0.10) | 0.60<br>(0.06) |
| Recubrimiento (mm)                                                               | 50 (2.5)       | 40 (2)         | 40 (2)         | 40 (2)         | 40 (2)         |
| Intervalo de mantenimiento expresado en años ( $\beta_{lim} / \beta(t) = 60\%$ ) | 9              | 12             | 10             | 17             | 25             |

Tabla 2: Parámetros de durabilidad para el cálculo de la fiabilidad de cada alternativa.

en adelante). Las dos últimas opciones de diseño se basan en hormigón con adiciones de humo de sílice y cenizas volantes (alternativas SF5 y FA20 en adelante). Estos dos subproductos reducen el contenido de cemento necesario para obtener una resistencia característica a la compresión similar a la de la mezcla de hormigón de referencia. La composición y caracterización de cada opción de diseño a evaluar se presentan en la Tabla 1.

Para evaluar adecuadamente los impactos a lo largo del ciclo de vida, es necesario abordar las necesidades de mantenimiento de cada alternativa. Existen distintos métodos para evaluar el deterioro de las estructuras a lo largo de la fase de mantenimiento de su ciclo de vida [6]. Aquí, para que las alternativas sean comparables, se supone que las operaciones de mantenimiento se llevan a cabo para cada una en el año en que su índice de fiabilidad  $\beta$  alcanza el 60% de la fiabilidad objetivo  $\beta_{lim}$ . La fiabilidad objetivo se toma como  $\beta_{lim} = 1.3$ , que corresponde a una probabilidad de fallo del 10% [34]. La caracterización probabilística de los parámetros utilizados para el cálculo basado en la fiabilidad de la durabilidad de cada diseño, así como el intervalo de mantenimiento resultante, se resumen en la Tabla 2. La Tabla 2 proporciona el valor medio de cada parámetro, así como la desviación estándar entre paréntesis.

Para evaluar los impactos económicos, medioambientales y sociales del ciclo de vida resultante de cada alternativa durante las fases de construcción, uso, mantenimiento y fin de vida, se ha definido un conjunto de 9 criterios. Los dos primeros criterios están relacionados con la dimensión económica de la sostenibilidad y tienen en cuenta los costes económicos derivados de la instalación y el mantenimiento periódico de cada diseño, respectivamente. Los costes derivados del mantenimiento periódico y la demolición se descuentan a valores de 2022, suponiendo una tasa de descuento  $d = 2\%$ .

Se definen tres criterios para evaluar los impactos ambientales. Se trata de los tres indicadores ambientales finales propuestos por la técnica de evaluación ambiental del ciclo de vida ReCiPe [35]. El primero corresponde a los daños causados a la salud humana, el segundo está relacionado con los daños causados a los ecosistemas y el último impacto evalúa el aumento de la escasez de recursos debido al consumo de recursos naturales durante las actividades de extracción, producción e instalación. Los datos de inventario de los que se obtuvo la información pertinente para cuantificar los tres indicadores de punto final se recogieron de la base de datos medioambiental Ecoinvent.

Los cuatro últimos criterios tienen por objeto evaluar los impactos generados en la dimensión social de la sostenibilidad. Se derivan de Navarro et al. [36]. El primer criterio tiene en cuenta el empleo generado por las distintas actividades de producción, construcción, mantenimiento y demolición. El segundo indicador social considera la contribución de cada alternativa al desarrollo económico regional. El tercer impacto incluye la afección a los

usuarios de la infraestructura derivada de las excesivas actividades de mantenimiento, que pueden afectar a la accesibilidad de los usuarios, así como disminuir la seguridad del tráfico durante estas operaciones. El último indicador social da cuenta de cómo las distintas alternativas afectan a la opinión pública de las comunidades locales, ya que las actividades de mantenimiento pueden generar polvo, vibraciones o incluso afectar a la estética del entorno de la estructura. Los datos necesarios para caracterizar el trasfondo social de cada actividad del ciclo de vida se han obtenido de bases de datos estadísticas nacionales, como las de la Agencia Tributaria o el Instituto Nacional de Estadística.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL CICLO DE VIDA

Los impactos de cada opción de diseño en el ciclo de vida se muestran en las Figuras 1 a 3. Debe tenerse en cuenta que los impactos aquí presentados no están ponderados. Atendiendo a la dimensión económica, puede observarse que la solución que incurre

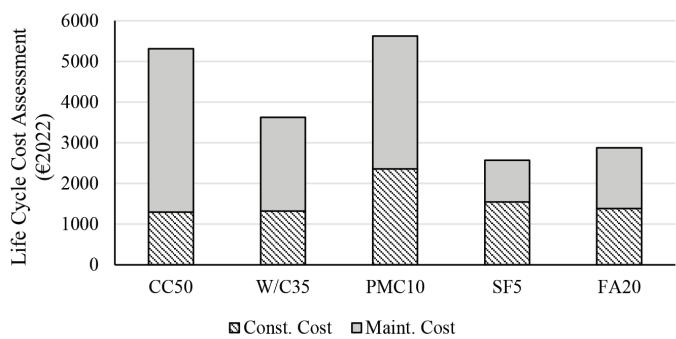


Figura 1. Impactos económicos del ciclo de vida. Resultados no ponderados.

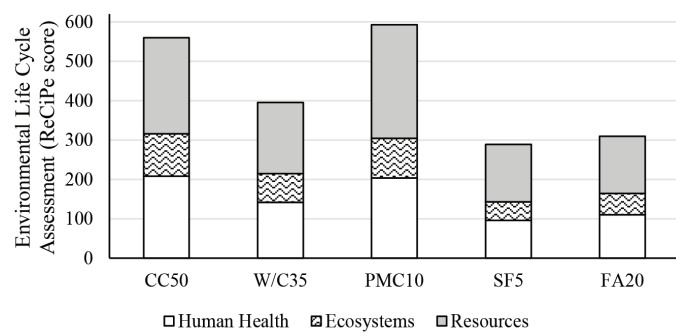


Figura 2. Impactos medioambientales del ciclo de vida. Resultados no ponderados.

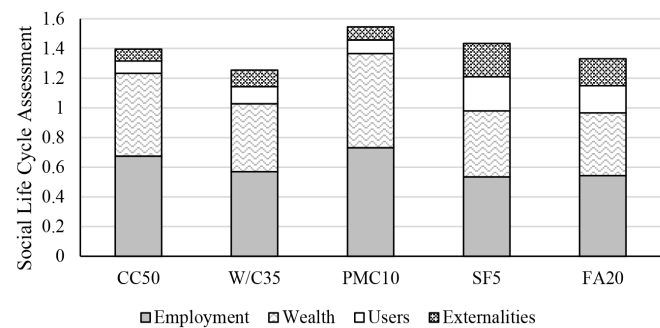


Figura 3. Impacto en el ciclo de vida social. Resultados no ponderados.

| Decisor                                  | DM <sub>1</sub> | DM <sub>2</sub> | DM <sub>3</sub> |
|------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Años de experiencia                      | 5               | 19              | 15              |
| Experiencia en evaluación económica      | 0.8             | 0.8             | 0.4             |
| Experiencia en evaluación medioambiental | 1               | 0.4             | 0.8             |
| Experiencia en evaluación social         | 0.6             | 1               | 0.6             |
| Conocimientos en diseño estructural      | 0.6             | 1               | 1               |
| Credibilidad de DM $\delta_i$            | 0.653           | 0.840           | 0.718           |
| Indeterminación media de DM $\theta_i$   | 0.512           | 0.455           | 0.424           |
| Incoherencia de DM $\epsilon_i$          | 0.265           | 0.270           | 0.229           |
| Poder de voto del experto $\varphi_i$    | 0.310           | 0.346           | 0.344           |

Tabla 3: Parámetros definitorios del poder de voto de cada experto.

en menores costes del ciclo de vida es la basada en la adición de humo de sílice a la mezcla de hormigón (SF5), seguida de cerca por la alternativa FA20. La solución menos económica, en este caso, sería la que utiliza hormigón modificado con polímeros (PMC10), que duplica los costes del ciclo de vida de las soluciones más económicas. Es importante señalar que, en todos los casos, salvo en el de SF5, los costes de mantenimiento son superiores a los de construcción. Las operaciones de mantenimiento pueden llegar a triplicar los costes de construcción, como en el caso del CC50.

En cuanto a los resultados medioambientales, se observa una tendencia similar, siendo SF5 la solución que presenta un mejor comportamiento medioambiental, y PMC10 resultando de nuevo la peor solución. Especialmente relevantes para cada alternativa son los impactos de la escasez de recursos naturales. Cabe señalar que, mientras que los criterios económicos y medioambientales son de tipo coste, los criterios sociales se definen como de tipo beneficio, es decir, cuanto mayor sea el impacto social, mejor. Puede observarse que, en el caso que nos ocupa, los impactos sobre los usuarios y la opinión pública son casi insignificantes en comparación con los efectos sobre los trabajadores y el desarrollo regional en el caso de las alternativas más exigentes en mantenimiento. En el caso de SF5 y FA20, aunque los impactos sobre los trabajadores y el desarrollo regional son más significativos, los impactos sobre los usuarios y la opinión pública ocupan hasta un tercio de su puntuación social total.

4.2. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS EN MATERIA DE SOSTENIBILIDAD

Para evaluar los resultados en materia de sostenibilidad, es necesario convertir los resultados presentados anteriormente en un indicador que permita comparar las distintas alternativas y tomar una decisión. Para ello se aplican otras técnicas MCDM. Sin embargo, en el caso del ANP, el resto de técnicas MCDM analizadas aquí requieren ponderar los criterios como entrada para el análisis. Como ANP da lugar tanto a la puntuación de las alternativas como a la ponderación de los criterios, las ponderaciones de esta técnica se utilizan como dato de entrada para la aplicación del resto de métodos. Cabe señalar que los resultados de las técnicas de MCDM siempre están influidos en mayor o menor medida por la subjetividad de los responsables de la toma de decisiones. En la presente investigación, esta fuente de subjetividad aparece cuando se pide a los responsables de la toma de decisiones que comparen la relevancia de los criterios como paso adecuado para aplicar las técnicas AHP y ANP. Existen varios enfoques para reducir la subjetividad de los resultados, como reducir el número de juicios requeridos por cada decisor o seguir un enfoque difuso para modelar las incertidumbres como fuente de información relevante [31]. Sin embargo, la evaluación subjetiva de los resultados queda

| Decisor                          | DM <sub>1</sub> | DM <sub>2</sub> | DM <sub>3</sub> | ΣDM <sub>i</sub> |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Costes de construcción           | 0.037           | 0.120           | 0.020           | 0.060            |
| Gastos de mantenimiento          | 0.033           | 0.094           | 0.025           | 0.051            |
| Daños a la salud humana          | 0.169           | 0.149           | 0.206           | 0.175            |
| Daños a los ecosistemas          | 0.321           | 0.290           | 0.299           | 0.303            |
| Escasez de recursos              | 0.243           | 0.233           | 0.199           | 0.225            |
| Generación de empleo             | 0.086           | 0.044           | 0.074           | 0.067            |
| Desarrollo económico regional    | 0.052           | 0.033           | 0.057           | 0.047            |
| Afecto a los usuarios            | 0.030           | 0.019           | 0.052           | 0.034            |
| Opinión pública – Externalidades | 0.029           | 0.019           | 0.068           | 0.039            |

Tabla 4: Ponderación normalizada de los criterios para cada experto y tras la agregación.

fuera del alcance del presente estudio.

4.2.1. Ponderación de los criterios

Tres expertos han participado en el proceso ANP para obtener las ponderaciones agregadas de los criterios. En la Tabla 3 se presenta la caracterización neutrosófica de cada uno de ellos y su respectivo poder de voto resultante de aplicar la metodología descrita anteriormente.

La tabla 4 muestra la ponderación normalizada de los criterios de cada experto tras aplicar la técnica ANP y las ponderaciones agregadas resultantes tras asignar a cada DM su respectiva relevancia de voto.

4.2.2. Resultados MCDM

A continuación, se aplican los métodos TOPSIS, COPRAS, VIKOR y ANP para obtener una puntuación relativa de cada alternativa de diseño que refleje su comportamiento en materia de sostenibilidad a lo largo de su ciclo de vida. Las ponderaciones agregadas y normalizadas de los criterios obtenidas tras aplicar el proceso ANP sirven de entrada para utilizar las técnicas COPRAS, VIKOR y TOPSIS. Los resultados obtenidos asumiendo estas ponderaciones se presentan en la Tabla 5.

Se observa que, independientemente de la técnica MCDM aplicada, SF5 ha resultado la mejor alternativa, seguida en todos los casos por la alternativa FA20. El excelente comportamiento durante el ciclo de vida de los diseños de hormigón con humo de sílice o cenizas volantes como adiciones a la mezcla de hormigón se basa en la reducción de las operaciones de mantenimiento previstas para garantizar la vida útil requerida. Sin embargo, con la alta durabilidad de estas soluciones, el rendimiento medioambiental de estos diseños ha resultado ser esencial para conseguir tan buena puntuación. Esto se explica por el hecho de que la adición de humo de sílice y cenizas volantes a las mezclas de hormigón reduce el cemento necesario para obtener la resistencia a la compresión deseada. Dado que la producción de cemento es uno de los principales factores de estrés medioambiental a lo largo del ciclo de vida de toda estructura de hormigón, la reducción del contenido de cemento en las mezclas de hormigón resulta esencial para mejorar la respuesta medioambiental de estos diseños. Además,

| Alternativa | TOPSIS | VIKOR | COPRAS | ANP   |
|-------------|--------|-------|--------|-------|
| CC50        | 0.183  | 0.976 | 0.525  | 0.156 |
| W/C35       | 0.609  | 0.352 | 0.686  | 0.194 |
| PMC10       | 0.129  | 0.923 | 0.524  | 0.150 |
| SF5         | 0.915  | 0.006 | 0.939  | 0.260 |
| FA20        | 0.866  | 0.055 | 0.863  | 0.240 |

Tabla 5: Puntuación alternativa aplicando distintas técnicas de MCDM.

las cenizas volantes y el humo de sílice son subproductos de la industria, por lo que su reutilización tiene un impacto medioambiental positivo que contribuye al concepto de economía circular. Los beneficios de las adiciones a base de humo de sílice y cenizas volantes desde la perspectiva del ciclo de vida ya se han descrito en investigaciones anteriores [37], aunque no en entornos agresivos y expuestos a cloruros.

Se observa que las soluciones con peores resultados en cuanto a su sostenibilidad son CC50 y PMC10, en función de la técnica MCDM aplicada. En cuanto al CC50, se concluye que el aumento del recubrimiento de hormigón a un diseño convencional en ambientes expuestos a cloruros es ineficiente, ya que las demandas de mantenimiento son excesivas, así como los impactos a lo largo de la etapa del ciclo de vida de uso y mantenimiento (Figuras 1 a 3). Por otro lado, el efecto positivo asociado al aumento de la durabilidad al añadir aditivos a base de látex a un diseño convencional se ve contrarrestado por los elevados impactos medioambientales asociados a la producción y el transporte de este material. Estos resultados concuerdan con investigaciones recientes [38].

Para evaluar el rendimiento de cada método MCDM, se analiza su capacidad de diferenciación. Esta capacidad de diferenciación de una técnica MCDM *i* se determina aquí mediante un índice *C<sub>i</sub>* obtenido como:

$$C_i = \frac{|Q_{best,i} - Q_{2nd,i}|}{|Q_{best,i} - Q_{worst,i}|}$$

(19)

donde *Q<sub>best,i</sub>* es la puntuación resultante para la mejor solución según la técnica MCDM *i*, *Q<sub>2nd,i</sub>* la puntuación de la segunda mejor solución, y *Q<sub>worst,i</sub>* es la puntuación de la alternativa con menor puntuación. Los índices de diferenciación de cada solución se muestran en la Tabla 6.

En particular, este estudio de caso muestra que tanto ANP como COPRAS tienen las mayores capacidades de diferenciación. Esto contradice el pensamiento habitual de que TOPSIS podría conducir a una diferenciación más significativa entre alternativas porque se basa en una normalización vectorial de las alternativas y no en una normalización lineal, como ocurre con otras técnicas de MCDM como COPRAS.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio es evaluar la sostenibilidad del ciclo de vida de cinco opciones de diseño diferentes para un puente de hormigón en una localización costera. Para ello, se han utilizado cuatro técnicas MCDM reconocidas: ANP, TOPSIS, VIKOR y COPRAS. Tres expertos han participado en la evaluación de los criterios. Los resultados del estudio indican que el uso de hormigones que incluyen una pequeña cantidad de humo de sílice en la mezcla conduce a un rendimiento sobresaliente en comparación con otras opciones de diseño que buscan mejorar la durabilidad de las estructuras de hormigón, como aumentar el recubrimiento del hormigón, reducir la relación a/c o incluir polímeros en el hormigón. Esta conclusión se basa en la mayor durabilidad de las soluciones a base de humo de sílice en entornos expuestos a cloruros, ya que

|                              | TOPSIS | VIKOR | COPRAS | ANP   |
|------------------------------|--------|-------|--------|-------|
| $ Q_{best,i} - Q_{2nd,i} $   | 0.049  | 0.049 | 0.075  | 0.020 |
| $ Q_{best,i} - Q_{worst,i} $ | 0.732  | 0.970 | 0.413  | 0.104 |
| <i>C<sub>i</sub></i>         | 0.067  | 0.050 | 0.182  | 0.191 |

Tabla 6: Evaluación de los índices de diferenciación *C<sub>i</sub>* para cada método.

la menor porosidad del hormigón impide que los cloruros accedan a las armaduras. Como resultado, los requisitos de mantenimiento de esta solución son insignificantes en comparación con las demás alternativas. La adición de altas proporciones de cenizas volantes también produce muy buenos rendimientos del ciclo de vida por razones similares. Estas conclusiones son coherentes independientemente del método de toma de decisión aplicado.

## REFERENCIAS

- [1] Lehne, J. & Preston, F., Making concrete change – Innovation in low-carbon cement and concrete. The Royal Institute of International Affairs, 2018. ISBN 978 1 78413 272 9.
- [2] Peng, J., Yang, Y., Bian, H., Zhang, J. & Wang, L., Optimisation of maintenance strategy of deteriorating bridges considering sustainability criteria. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(3), pp. 395-411, 2022.
- [3] Sánchez-Garrido, A.J., Navarro, I.J., & Yepes, V., Multi-criteria decision-making applied to the sustainability of building structures based on Modern Methods of Construction. *Journal of Cleaner Production*, 330, p. 129724, 2022.
- [4] Molina-Moreno, F., García-Segura, Martí, J.V. & Yepes, V., Optimization of Butressed Earth-Retaining Walls using Hybrid Harmony Search Algorithms. *Engineering Structures*, 134, pp. 205-216, 2017.
- [5] Torres-Machí, C., Chamorro, A., Videla, C., Pellicer, E. & Yepes, V., An iterative approach for the optimization of pavement maintenance management at the network level. *The Scientific World Journal*, 2014, p. 524329, 2014.
- [6] Hadizadeh-Bazaz, M., Navarro, I.J. & Yepes, V., Performance comparison of structural damage detection methods based on frequency response function and power spectral density. *DYNA*, 97, pp. 493-500, 2022.
- [7] Ascione, F., De Masi, R. F., Mastellone, M. & Vanoli, G. P., Building rating systems: A novel review about capabilities, current limits and open issues. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103498, 2022.
- [8] Munda, G., Multiple Criteria Decision Analysis and Sustainable Development. *Operations Research & Management Science*, 233, pp. 1235-1267, 2016.
- [9] Sousa, M., Almeida, M.F. & Calili, R., Multiple Criteria Decision Making for the Achievement of the UN Sustainable Development Goals: A Systematic Literature Review and a Research Agenda. *Sustainability*, 13(8), p. 4129, 2021.
- [10] Tučník, P. & Bureš, V., Experimental Evaluation of Suitability of Selected Multi-Criteria Decision-Making Methods for Large-Scale Agent-Based Simulations. *PLOS ONE*, 11(11), p. e0165171, 2016.
- [11] C.L. Hwang & K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [12] Navarro, I.J., Penadés-Plà, V., Martínez-Muñoz, D., Rempling, R. & Yepes, V., Life cycle sustainability assessment for multi-criteria decision making in bridge design: a review. *Journal of Civil Engineering & Management*, 26(7), pp. 690-704, 2020.
- [13] Jia, J., Ibrahim, M., Hadi, M., Orabi, W. & Xiao, Y., Multi-Criteria Evaluation Framework in Selection of Accelerated Bridge Construction (ABC) Method. *Sustainability*, 10(11), p. 4059, 2018.
- [14] Marzouk, M. & Sabbah, M., AHP-TOPSIS social sustainability approach for selecting supplier in construction supply chain. *Cleaner Environmental Systems*, 2, p. 100034, 2021.
- [15] Saaty, T.L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1981.
- [16] Opricovic, S., Multicriteria optimization of civil engineering systems. *Fac. Civ. Eng. Belgrade*, 2, 5-21, 1998.
- [17] Kripka, M., Yepes, V. & Milani, C.J., Selection of sustainable short-span bridge design in Brazil. *Sustainability*, 11(5), p. 1307, 2019.
- [18] Bansal, S., Singh, A. & Singh, S.K., Sustainability evaluation of two iconic bridge corridors under construction using Fuzzy Vikor technique: A case study. *Revista ALCONPAT*, 7(1), 2017.
- [19] García-Segura, T., Penadés-Plà, V. & Yepes, V., Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 202, pp. 904-915, 2018.
- [20] Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A. & Sarka, V., The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. *Technological and Economic Development of Economy*, 1(3), pp. 131-139, 1994.
- [21] Mulliner, E., Malys, N. & Maliene, V., Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability. *Omega*, 59, pp. 146-156, 2016.
- [22] Nuuter, T., Lill, I. & Tupenaite, L., Comparison of housing market sustainability in European countries based on multiple criteria assessment. *Land Use Policy*, 42, pp. 642-651, 2015.
- [23] Invidiata, A., Lavagna, M. & Ghisi, E., Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings. *Building and Environment*, 139, pp. 58-68, 2018.
- [24] Zolfani, S.H., Pourhossein, M., Yazdani, M. & Zavadskas, E.K., Evaluating construction projects of hotels based on environmental sustainability with MCDM framework. *Alexandria Engineering Journal*, 57(1), pp. 357-365, 2018.
- [25] Krishankumar, R., Mishra, A.R., Cavallaro, F., Zavadskas, E.K., Antuchevičienė, J. & Ravichandran, K.S., A New Approach to the Viable Ranking of Zero-Carbon Construction Materials with Generalized Fuzzy Information. *Sustainability*, 14(13), p. 7691, 2022.
- [26] Saaty, T.L., Fundamentals of the analytic network process – Dependence and feedback in decision-making with a single network. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13, pp. 129-157, 2004.
- [27] Ignatius, J., Rahman, A., Yazdani, M., Šaparauskas, J. & Haron, S.H., An integrated fuzzy anp-qfd approach for green building assessment. *Journal of Civil Engineering & Management*, 22(4), pp. 551-563, 2016.
- [28] Dehdasht, G., Zin, R.M., Ferwati, M.S., Abdullahi, M.M., Keyvanfar, A. & McCaffer, R., DEMATEL-ANP Risk Assessment in Oil and Gas Construction Projects. *Sustainability*, 9(8), p.1420, 2017.
- [29] Mahmoudkelaye, S., Azari, K.T., Pourvaziri, M. & Asadian, E., Sustainable material selection for building enclosure through ANP method. *Case Studies in Construction Materials*, 9, p. e00200, 2018.
- [30] Navarro, I.J., Martí, J.V. & Yepes, V., Group analytic network process for the sustainability assessment of bridges near shore. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 157, WIT Press, 2022, ISSN 174-3541
- [31] Sierra, L.A., Pellicer, E. & Yepes, V., Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review*, 65, pp. 41-53, 2017.
- [32] Sodenkamp, M.A., Tavana, M., & Di Caprio, D. An aggregation method for solving group multi-criteria decision-making problems with single-valued neutrosophic sets. *Applied Soft Computing*, 71, pp. 715-727, 2018.
- [33] Navarro, I.J., Yepes, V. & Martí, J.V., Sustainability assessment of concrete bridge deck designs in coastal environments using neutrosophic criteria weights. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16 (7), pp. 949-967, 2020.
- [34] ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures. Geneva, ISO, 2015.
- [35] Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J. & Van Zelm, R. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. The Hague: Ministerie van Volkshuisvesting, 2009.
- [36] Navarro, I.J., Yepes, V. & Martí, J.V., Social life cycle assessment of concrete bridge decks exposed to aggressive environments. *Environmental Impact Assessment Review*, 72, pp. 50-63, 2018.
- [37] Tait, M., Cheung, W., A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of three concrete mix designs. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(6), p. 847e860, 2016.
- [38] Navarro, I.J., Yepes, V., Martí, J.V. & González-Vidosa, F., Life cycle impact assessment of corrosion preventive designs applied to prestressed concrete bridge decks. *Journal of Cleaner Production*, 196, pp. 698-713, 2018