

DISEÑO, FABRICACIÓN, TRANSPORTE E INSTALACIÓN DE “ARRECIFES ARTIFICIALES VERDES” EN LAS RÍAS GALLEGAS: UNA OPORTUNIDAD DE ECONOMÍA CIRCULAR Y DESARROLLO SOSTENIBLE

**Carral Couce L.¹, Rodriguez Guerreiro M.J¹, Lamas Galdo I.¹, Santiago Caamaño L.,
Camba Fabal C¹, Tarrío Saavedra J.¹, Díaz Díaz A.¹, Castro Santos L.¹, Alvarez Feal C.¹,
Munín Doce A.¹, Cartelle Barros J.J¹, Carballo Sánchez R.²**

¹ Escuela Politécnica de Ingeniería de Ferrol – Universidade da Coruña, ²Escola Politécnica Superior – Universidad de Santiago de Compostela

¹lcarral@udc.es

RESUMEN

Las rías gallegas están sufriendo las consecuencias de la contaminación y de patrones de pesca poco sostenibles. El volumen de capturas de muchas especies es cada vez más reducido, lo que supone graves pérdidas económicas para la actividad pesquera y marisquera.

La recuperación de los ecosistemas marinos de las rías mediante el empleo de arrecifes artificiales (ARs) representa una oportunidad prometedora para uno de los principales pilares socio-económicos de Galicia. La aplicación de los principios de la economía circular y el desarrollo sostenible en el proceso de fabricación, transporte e instalación de ARs resulta fundamental para la obtención de beneficios socio-económicos con el mínimo impacto ambiental.

En este trabajo se estudia la posibilidad de fabricar arrecifes artificiales verdes (ARVs). La incorporación de residuos de concha de la industria conservera gallega y de materiales de deshecho procedentes de la industria naval permite reducir el empleo de árido del hormigón. La idoneidad de los materiales propuestos se demuestra mediante ensayos mecánicos y un posterior análisis estadístico.

En la evaluación del índice de sostenibilidad de diferentes ARVs se ha empleado un modelo basado en un método multicriterio de toma de decisiones, teniendo en cuenta indicadores económicos, sociales y medioambientales. También se han estimado los potenciales de calentamiento global y



de demanda energética acumulada asociados a un programa de recuperación de los ecosistemas marinos de todas las rías gallegas. En el trabajo se han considerado diferentes alternativas de fabricación y de transporte y se presentan brevemente varias líneas futuras de trabajo.

Es importante destacar que todos estos trabajos se han realizado en el marco del convenio PROARR financiado por la Xunta de Galicia, que tiene como objetivo el desarrollo, fabricación e instalación de arrecifes artificiales respetuosos con el medio ambiente y que permitan la regeneración de los ecosistemas de las rías gallegas.

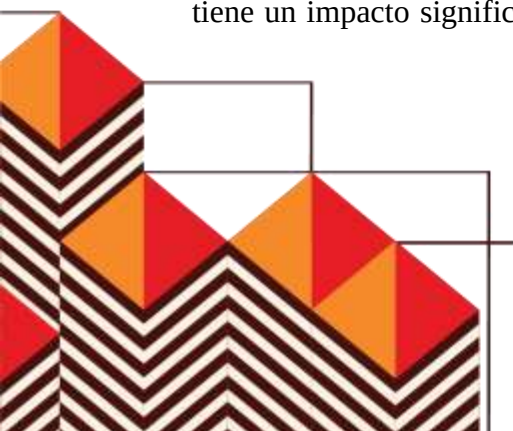
Palabras claves: arrecifes artificiales, sostenibilidad, economía circular.

1- INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas marinos están fuertemente amenazados en todo el planeta debido al calentamiento global, la contaminación de los mares y patrones de pesca poco sostenibles. La presión a la que están sometidos hace que ciertos hábitats costeros estén próximos a alcanzar el límite global de absorción de impactos, lo que repercute en un empobrecimiento de la vida submarina.

Las rías gallegas destacan por sus características geográficas y por ser, tradicionalmente, una importante fuente de recursos y de diversidad biológica. Más del 50% de la población gallega vive en zonas costeras en las que la industria pesquera y marisquera han sido históricamente un pilar socio-económico básico. De acuerdo con la literatura existente, la acuicultura es actualmente la primera actividad pesquera en términos de volumen, seguida por la pesca marítima y el marisqueo. Sin embargo, este orden se ve alterado si se habla en términos de valor, pasando la pesca a ocupar la primera posición, que es, precisamente la actividad que más sufre la degradación ambiental. Esto no es aplicable solo a Galicia. España ocupa el tercer lugar en el comercio pesquero internacional, debido, en gran medida, a la contribución gallega.

En el caso concreto de la pesca artesanal, la degradación de los ecosistemas de las rías gallegas tiene un impacto significativo sobre esta actividad. Las estadísticas muestran que en los últimos



años se ha producido un descenso constante en el volumen de captura de ciertas especies. La pérdida aproximada es de 36 millones de euros al año.

La industria conservera en Galicia es otro de los motores fundamentales de su economía, siendo la segunda mayor del mundo. Galicia también es la segunda productora mundial de mejillón, sólo por detrás de China. El aspecto negativo de esta industria es la generación de miles de toneladas de residuo de concha, que son potencialmente perjudiciales para los seres vivos y para el medio ambiente. En el caso del mejillón, los residuos de concha suponen un porcentaje elevado del peso total del producto y están compuestos por una fase mineral de carbonato de calcio y una matriz orgánica con nitrógeno, potasio, azufre, o fósforo, entre otros elementos. Actualmente, estos residuos no se reutilizan de forma extensiva, lo que supone un problema económico y ambiental. De hecho, muchos de estos residuos de concha son gestionados como residuos sólidos urbanos o en empresas de procesamiento de conchas de bivalvos. En el peor de los casos, los residuos se depositan de forma no controlada en lugares no habilitados para tal fin, especialmente en épocas de alta producción.

Se hace necesario un programa de recuperación de los hábitats marinos degradados de las rías gallegas, en el que los arrecifes artificiales (ARs) pueden representar una oportunidad prometedora, ya que cualquier estructura sumergida tiene capacidad para potenciar los recursos marinos vivos. Si bien los ARs tienen como objetivo la recuperación de ecosistemas marinos y el beneficio económico y social, también ha de tenerse en cuenta el impacto ambiental derivado de su construcción, transporte e instalación.

Entrando en mayor detalle, los ARs mejoran la producción pesquera, potencian la circulación de nutrientes, actúan como refugio para todo tipo de especies y mejoran la transferencia de energía al proporcionar sustrato adicional para el asentamiento de algas e invertebrados. Además, hay que añadir otros beneficios relacionados con la pesca y el buceo recreativos o el turismo.

Tradicionalmente los arrecifes artificiales se clasificaban en dos tipos: arrecifes artificiales de oportunidad (AROs) y arrecifes artificiales convencionales (ARCs). En el primer grupo se



encuentran fundamentalmente embarcaciones fuera de servicio o neumáticos que se depositan en el fondo del mar.

Los ARCs son sistemas creados de forma específica para la rehabilitación de ecosistemas marinos. Suelen ser estructuras modulares con oquedades, siendo el hormigón (mezcla de cemento, arena, grava, agua y aditivos) el material habitual en su fabricación. La producción de hormigón es considerablemente perjudicial para el medio ambiente debido a los áridos empleados (arena y grava), que representan entre el 60 y el 80% del volumen, y a otros materiales técnicos como las armaduras. Además, la extracción de grandes cantidades de áridos en zonas costeras provoca alteraciones en las corrientes y en el oleaje, aumentando la erosión y generando un retroceso del litoral. A esto hay que añadir que la industria de fabricación del cemento es una de las mayores productoras de gases de efecto invernadero a nivel global.

Hay dos conceptos de gran relevancia y estrechamente relacionados entre sí al plantearse el uso de arrecifes artificiales verdes (ARVs): la economía circular y el desarrollo sostenible. En una economía lineal (fabricar, usar y eliminar) se consumen materias primas para fabricar productos con una determinada vida útil, generando residuos que hay que tratar o eliminar. El tratamiento y la eliminación de residuos son actividades que pueden llegar a ser tremendamente costosas en términos monetarios. En una economía circular, los residuos vuelven al ciclo productivo, habitualmente tras un proceso de reciclaje, y terminan convirtiéndose en un recurso para un nuevo ciclo de vida. De esta forma, se le aporta valor a algo que originalmente no lo tenía. A esta valorización de residuos hay que añadir un menor consumo de materias primas, parcialmente reemplazadas por los residuos reciclajes y una reducción del impacto ambiental.

El desarrollo sostenible y la sostenibilidad integral van más allá de los aspectos puramente ambientales, teniendo en cuenta además aspectos económicos, sociales e incluso técnicos. En general, estos dos conceptos están asociados a satisfacer las necesidades de los seres humanos a través de un consumo eficiente y controlado de los recursos naturales, lo que debería ayudar a reducir el impacto ambiental sobre el medio. En una interpretación más amplia de estos dos



términos, se puede afirmar que los seres humanos tienen derecho a una vida sana y productiva en armonía con la naturaleza, por lo que también entran en juego criterios éticos y culturales.

La producción, el transporte y la instalación de ARs deben ajustarse a los principios de la economía circular y del desarrollo sostenible, de forma que los potenciales impactos negativos sobre el medio no sean superiores a los beneficios derivados de su instalación. En este sentido, el empleo de ARVs que incorporen residuos de concha como materiales sustitutivos del cemento y la arena, y de otros materiales convencionales del hormigón como las armaduras de acero, surge como una oportunidad prometedora de economía circular y desarrollo sostenible.

En resumen, el empleo de ARVs serviría para reducir el impacto ambiental derivado del consumo de recursos naturales no renovables, que incluyen la extracción, tratamiento y transporte de estos recursos, y el volumen de residuos de concha a eliminar en la industria conservera.

Este trabajo presenta los siguientes objetivos principales:

- Reemplazar los áridos del hormigón por residuos de concha y por materiales de deshecho procedentes de la industria naval. Demostrar la idoneidad de los materiales propuestos para la fabricación de ARs mediante ensayos mecánicos y un posterior análisis estadístico.
- Crear un modelo basado en un método multicriterio de toma de decisiones (MCDM: *Mulcriteria Decision Making Method*) con el objetivo de evaluar la contribución al desarrollo sostenible de diferentes arrecifes artificiales verdes, cada uno de ellos con un determinado porcentaje de sustitución de materiales convencionales.
- Evaluar el potencial de calentamiento global (PCG), así como la demanda energética acumulada (DEA), asociado a un programa de recuperación de los ecosistemas marinos de todas las rías gallegas. Para ello se considerarán diferentes opciones de fabricación (producción centralizada y descentralizada, en ambos casos con el mix eléctrico español y con un mix alternativo basado en energías renovables) y de transporte, tanto terrestre (camión rígido y articulado) como marítimo (barco de servicio y buque granelero). Para



el transporte se explora la posibilidad de emplear combustible diésel o gas natural licuado.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

Cada uno de los objetivos presentados en el apartado anterior tiene su propia metodología, por lo que este apartado se divide en tres partes. De ellas, la primera se divide, a su vez, en dos: una vinculada a los ensayos mecánicos y otra al análisis estadístico.

2.1. Sustitución de áridos por residuos de concha y materiales de deshecho en la fabricación de ARs

2.1.1. Ensayos mecánicos

En primer lugar se seleccionaron los residuos y materiales de deshecho a emplear como sustitutos del árido utilizado en la producción de hormigón. Se han considerado residuos de concha de mejillón y ostra, granalla, lana de roca y lana de fibra de vidrio [1]. Posteriormente se determinaron las proporciones óptimas de cada uno de los componentes materiales del hormigón, sin la adición de materiales reciclados. Para ello se fabricó un conjunto de probetas con diferentes dosificaciones. Una vez elaborada la masa, la consistencia del hormigón de cada una de las probetas fue ensayada mediante la prueba del cono de Abrams. Además se elaboraron diferentes muestras que fueron compactadas con un vibrador de aguja. Tras 24 horas, las muestras se desmoldaron y se sumergieron en un baño de agua a 20° C, donde se curaron entre 7 y 28 días.

Las probetas con los mejores resultados determinaron las proporciones de los componentes materiales convencionales y se generaron nuevas dosificaciones en las que los materiales reciclados fueron reemplazando al árido fino. Los compuestos elaborados con materiales reciclados fueron sometidas a dos ensayos: uno de compresión y otro de absorción a través del método Fagerlund.



2.1.2. *Análisis estadístico*

Para identificar las variables que influyen en el valor de la resistencia a compresión y en el valor de la vida útil bajo el mismo tipo de esfuerzo, se han aplicado técnicas de análisis exploratorio y relacionadas con el Statistical Learning [1], como procedimientos de selección de variables y ajuste de modelos de regresión lineal multivariante.

Además de identificar dichas variables, se ha estudiado el grado de influencia de cada una de estas sobre la resistencia a compresión y tiempo de vida, lo cual facilita el diseño de hormigones con propiedades específicas.

Como resultado, se han estimado funciones predictivas en las que las relaciones entre las variables respuesta y predictores significativos se han definido a partir de una serie de parámetros. También se ha analizado el efecto de estas variables sobre el índice de absorción del hormigón al cabo de 3 y 24 horas. Estas variables recogen información relevante acerca de la resistencia a la degradación del hormigón, entre otras propiedades. Se ha prestado especial atención al estudio del impacto del tipo de residuo y de la cantidad de este empleada como sustituto del árido sobre las propiedades del hormigón. El análisis estadístico se detalla en Carral et al. [1].

2.2. Método MIVES: Evaluación de la sostenibilidad integral de diferentes tipos de arrecifes artificiales verde

Para evaluar la sostenibilidad de diferentes ARVs se ha creado un modelo basado en el método MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible). Este método es una técnica MCDM determinista que se basa en el uso de árboles de requerimientos, funciones de valor y, opcionalmente, en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP: *Analytic Hierarchy Process*) [2].

El árbol de requerimientos es un esquema jerárquico que suele estar formado por tres niveles: requerimientos, criterios, e indicadores. El nivel más importante es el de los indicadores, que son las características específicas que se van a evaluar. Los otros dos niveles sirven para estructurar el problema y facilitar su comprensión; además de hacer lo propio con el proceso de cálculo.



La Tabla 1 muestra el árbol de requerimientos empleado en este estudio, junto con los correspondientes pesos o importancias relativas para los requerimientos (α_i), criterios (β_i) e indicadores (γ_i).

Tabla 1. Árbol de requerimientos del modelo basado en Ref. [2].

Requerimientos (α_i)	Criterios (β_i)	Indicadores (γ_i)
Económico (21%)	Coste total (82%)	Coste total (100%)
	Influencia en la industria conservera (18%)	Reducción de residuos (conchas) (100%)
Medioambiental (45%)	Influencia en la industria conservera (28%)	Reducción de residuos (conchas) (100%)
	Consumo de recursos y emisiones (36%)	Áridos (5%)
		Cemento (70%)
	Consumo de energía (24%)	Acero (25%)
		Consumo total de energía (100%)
		Acero (25%)
Social (34%)	Prosperidad general (100%)	Hormigón (75%)
		Sostenibilidad en la industria conservera (62.5%)
		Sostenibilidad en la industria maderera (37.5%)

El método MIVES permite comparar indicadores medidos en diferentes unidades mediante el uso de funciones de valor. Estas funciones son herramientas matemáticas para adimensionalizar los indicadores en una unidad común denominada valor o nivel de satisfacción (V_i), que varía entre 0 (peor solución posible) y 1 (mejor solución posible). Las funciones de valor también permiten considerar posibles no linealidades en la evaluación. Una vez que se han definido tanto el árbol de requerimientos como las funciones de valor, es posible estimar el índice de sostenibilidad (IS) de la alternativa a evaluar. Para ello se ha empleado la Ecuación (1). El IS se encuentra comprendido en el intervalo [0, 1], peor y mejor solución, respectivamente [2].



$$IS = \sum_{i=1}^{11} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i \quad (1)$$

2.3. Cálculo de los indicadores de PCG y DEA

El PCG asociado a la fabricación de un módulo de ARV, que es la unidad funcional (UF) considerada en este estudio, se estima a través de la Ecuación (2) [3]. Las unidades de medida son kg de CO_{2eq}/UF.

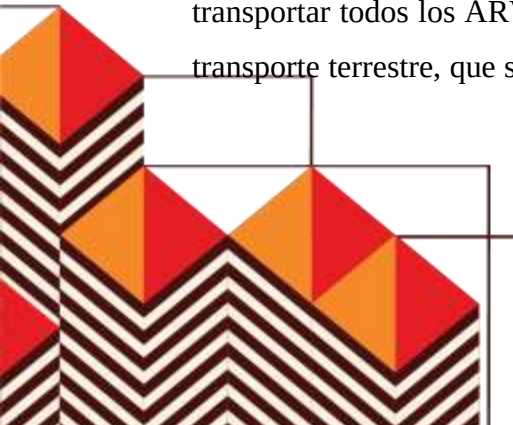
$$PCG_{fabricación} = \sum_{t=1}^9 CE_t \cdot PCG_{electricidad} \quad (2)$$

En la Ecuación 2, CE_t es el consumo de electricidad en kWh/UF asociado a cada una de las 9 etapas de fabricación de cada arrecife, mientras que PCG_{electricidad} es el factor de emisión en kg de CO_{2eq}/kWh, asociado al mix eléctrico correspondiente.

Mediante una expresión análoga a la Ecuación (2) es posible estimar la demanda de energía acumulada (DEA) asociada a la fabricación de un ARV [3], medida en MJ. Para estimar el PCG y la DEA asociados a un número superior de ARVs no hay más que multiplicar el resultado de la Ecuación (2) (y la asociada a DEA) por el número exacto de arrecifes. Hay que tener en cuenta que se está considerando un programa de recuperación de los ecosistemas marinos de todas las rías gallegas, por lo que será necesario un elevado número de ARVs. La Ecuación (3) permite estimar el PCG para la etapa de transporte terrestre, en kg de CO_{2eq} [3].

$$PCG_{terrestre} = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^{N_j} d_{j,k} \cdot n_{j,k} \cdot PCG_{km} \quad (3)$$

Donde N_j es el número de estuarios k pertenecientes a la zona j de la costa; d_{j,k} es la distancia en km entre el centro de producción y el puerto correspondiente; y n_{j,k} es el número de viajes para transportar todos los ARVs a la zona j. Por último, PCG_{km} es el factor de emisión para un km de transporte terrestre, que se mide en kg de CO_{2eq}/km. El PCG para el caso del transporte marítimo



se calcula de forma similar, añadiendo un término adicional que incluya el tiempo que la embarcación está parada durante el proceso de instalación [3].

La estimación de DEA para ambas etapas de transporte es análoga, reemplazando los factores de emisión por factores de consumo de energía [3]. Los resultados se expresan en MJ en lugar de kg de CO_{2eq}.

Para el cálculo de los valores totales de PCG y DEA asociados a la recuperación de todos los ecosistemas marinos de las rías gallegas es preciso agregar los resultados parciales medidos en las mismas unidades [3].

3- RESULTADOS

Este apartado se divide en tres partes, cada una de ellas asociada a uno de los objetivos señalado en el apartado 2.

3.1. Resultados de la sustitución de áridos por residuos de concha y materiales de deshecho: Ensayos mecánicos y de permeabilidad

La Figura 1 muestra los histogramas de variables críticas para la calidad (CTQ) del hormigón. Mediante el ajuste de modelos de regresión lineal multivariantes se ha estimado la relación de las variables CTQ (resistencia a compresión, Y_1 , tiempo de vida, Y_2 , y coeficiente de absorción de agua a 3 h, Y_3 y 24 h, Y_4) con respecto a los predictores relevantes: cantidad de fluidificante (x_4), agua (x_9), tipo de aditivo (x_{10}) y porcentaje de aditivo sustitutivo de arena (x_6):

$$Y_1 = 99.71 + -0.19X_4 + 0.47X_6 - 14.49X_9 + 3.62X_{10}[Fibra Vidrio] - 19.27X_{10}[Granalla] \\ - 2.71X_{10}[Lana Roca] - 19.83X_{10}[Mejillon] - 11.10X_{10}[Ostra] + \hat{\varepsilon}$$

$$Y_2 = 163.88 - 0.44X_4 + 0.65X_6 - 18.19X_9 + 6.17X_{10}[Fibra Vidrio] - 32.39X_{10}[Granalla] \\ + 1.91X_{10}[Lana Roca] - 34.02X_{10}[Mejillon] - 18.51X_{10}[Ostra] + \hat{\varepsilon}$$

$$Y_4 = 0.568 - 0.0215X_6 + 0.499X_{10}[Granalla] + 0.877X_{10}[Lana Roca] \\ + 0.293X_{10}[Mejillon] + 1.049X_{10}[Ostra] + \hat{\varepsilon}$$



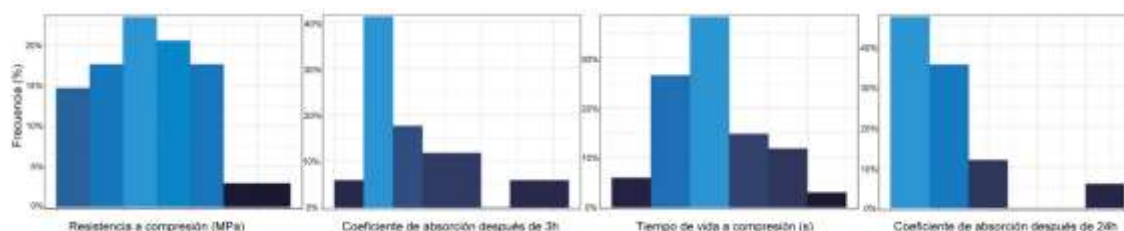


Fig. 1. Histogramas de las variables CTQ del hormigón [1].

De acuerdo con los resultados [1], el empleo de conchas de ostra o granalla en lugar de arena reduce la vida útil y la deformación del hormigón sometido a compresión. La lana de roca y la lana de fibra de vidrio obtuvieron resultados similares a los del hormigón convencional. De hecho, una mayor cantidad de arena reemplazada implica un incremento lineal en ambas variables. El estudio estadístico proporciona evidencias que apoyan el uso de conchas de mejillón como sustituto del árido convencional, otorgando una resistencia a la compresión aceptable y una capacidad de absorción de agua similar a la de la arena.

3.2. Resultados de la evaluación de la sostenibilidad

La Figura 2 muestra los índices de sostenibilidad (Ecuación (1)) de cuatro tipos de arrecife artificial verde (ARV₁, ARV₂, ARV₃ y ARV₄) y de un arrecife artificial convencional (ARC). Los cuatro primeros presentan diferentes porcentajes de reemplazo de materiales convencionales (arena, cemento y armaduras de acero) por conchas de mejillón y fibras de eucalipto [2]. El ARC sólo contiene materiales convencionales. Puede afirmarse que los arrecifes artificiales verdes presentan una mayor contribución al desarrollo sostenible que su homólogo convencional.



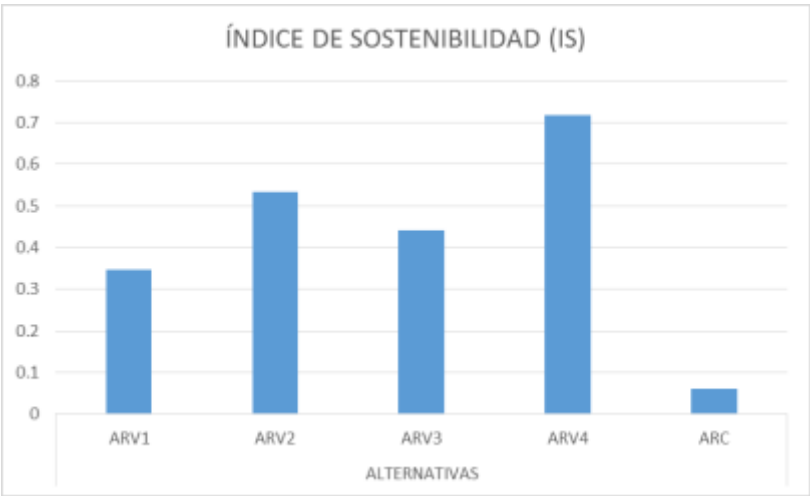


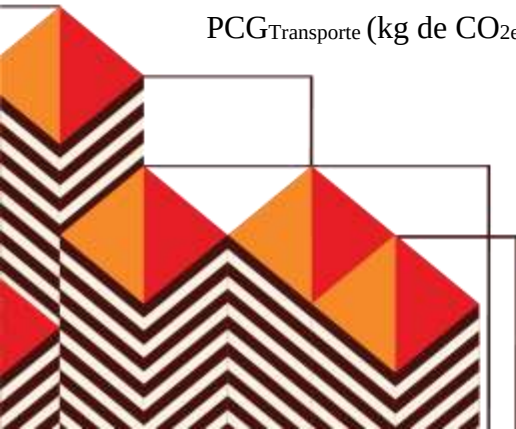
Fig. 2. Índices de sostenibilidad de diferentes ARVs y un ARC [2].

3.3.Resultados de PCG y DEA para la recuperación de las rías gallegas

La Tabla 2 presenta los resultados totales de PCG y DEA asociados a la instalación de 4080 ARVs en las costas gallegas. Se muestran los valores obtenidos tanto para el mejor como para el peor escenario posible. El mejor escenario está asociado a un mix eléctrico basado en energías renovables, a una producción descentralizada (una fábrica para cada una de las zonas de la costa gallega), y a la utilización de gas natural licuado para alimentar a los camiones articulados y al barco de servicio. El peor escenario se basa en una producción centralizada bajo el mix eléctrico propio de España, utilizando diésel como combustible tanto para los camiones rígidos como para el buque granelero [3].

Tabla 2. Resultados de PCG y DEA basado en Ref. [3].

Resultados	Mejor escenario	Peor escenario
PCG _{Fabricación} (kg de CO _{2eq.})	7.5E3	1.08E5
PCG _{Transporte} (kg de CO _{2eq.})	5.48E5	7.93E5

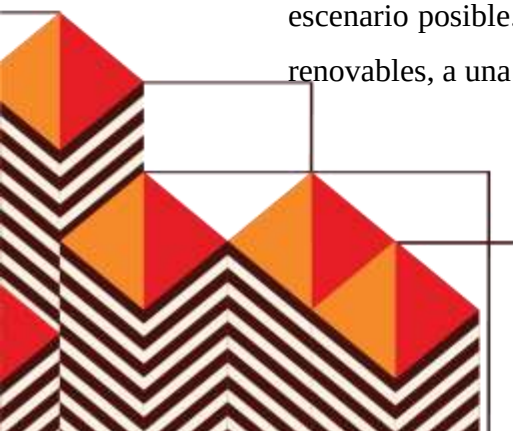


PCG_{Total} (kg de CO_{2eq.})	5.55E5	9.01E5
DEA _{Fabricación} (MJ)	4.86E4	2.17E6
DEA _{Transporte} (MJ)	5.92E6	7.95E6
DEA_{Total} (MJ)	5.97E6	10.12E6

4. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

En este trabajo se ha evaluado la sostenibilidad de diferentes tipos de arrecifes artificiales constituidos mediante hormigón, cuyas conclusiones se exponen a continuación:

- El empleo de conchas de ostra o granalla en lugar de arena reduce la vida útil y la deformación del hormigón sometido a compresión. La lana de roca y la lana de fibra de vidrio obtuvieron resultados similares a los del hormigón convencional. De hecho, una mayor cantidad de arena reemplazada implica un incremento lineal en ambas variables. El estudio estadístico proporciona evidencias que apoyan el uso de conchas de mejillón como sustituto del árido convencional, otorgando una resistencia a la compresión aceptable y una capacidad de absorción de agua similar a la de la arena.
- En cuanto a los índices de sostenibilidad de cuatro tipos de arrecife artificial verde (ARV1, ARV2, ARV3 y ARV4) y de un arrecife artificial convencional (ARC). Los cuatro primeros presentan diferentes porcentajes de reemplazo de materiales convencionales (arena, cemento y armaduras de acero) por conchas de mejillón y fibras de eucalipto. El ARC sólo contiene materiales convencionales. Puede afirmarse que los arrecifes artificiales verdes presentan una mayor contribución al desarrollo sostenible que su homólogo convencional.
- Se presenta los resultados totales de potencial de calentamiento global (PCG), así como la demanda energética acumulada (DEA) asociados a la instalación de 4080 ARVs en las costas gallegas. Se muestran los valores obtenidos tanto para el mejor como para el peor escenario posible. El mejor escenario está asociado a un mix eléctrico basado en energías renovables, a una producción descentralizada (una fábrica para cada una de las zonas de la



costa gallega), y a la utilización de gas natural licuado para alimentar a los camiones articulados y al barco de servicio. El peor escenario se basa en una producción centralizada bajo el mix eléctrico propio de España, utilizando diésel como combustible tanto para los camiones rígidos como para el buque granelero

Sin embargo, es posible ir más allá si se considera la sostenibilidad del propio ecosistema en términos de reversibilidad. En este sentido, ya se está trabajando en el posible desarrollo de un arrecife artificial verde cuyo diseño y fabricación permitan una durabilidad limitada en el tiempo. Se trataría de una aplicación positiva de la denominada obsolescencia programada. Es decir, el ARV se iría desgastando con el tiempo al estar sometido al efecto del agua salada, corrientes, mareas y olas, de forma que se degradaría y desaparecería por completo tras una determinada cantidad de años. Esto garantizaría la recuperación del ecosistema sin necesidad de modificarlo de forma permanente. Además permitiría ahorrarse los costes de desmantelamiento de los ARVs y evitar el impacto ambiental asociado.

Otra línea de trabajo futura consiste en incorporar a los ARVs materiales capaces de absorber sustancias contaminantes o sustancias eutrofizantes. Esto podría realizarse incorporando los materiales absorbentes en el proceso de fabricación de los arrecifes. O también podría amarrarse al ARV varias bolsas permeables que contengan materiales adsorbentes (oxihidróxidos de hierro y aluminio o cualquier otro sub-producto industrial no tóxico que sirva para lo que se pretende) mezclados con materia orgánica. Estas bolsas podrían ser reemplazadas cada cierto tiempo en función de la contaminación del ecosistema. Esto aumentaría ligeramente los costes, pero mejoraría sensiblemente la eficiencia y la rapidez del proceso de descontaminación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a D. Iván López (Universidad de Santiago de Compostela, USC), D^a. Andreina Vargas (USC), D. Humberto Carro (Universidade da Coruña, UDC) y D. José Ángel

Fraguela (UDC) la ayuda prestada para el adecuado desarrollo del convenio de investigación PROARR, en el marco del cual se ha elaborado el trabajo que aquí se presenta. También agradecen a la Xunta de Galicia la financiación otorgada para el desarrollo del mismo. Por último, los autores agradecen a D. Carlos Fernández Garrido sus múltiples sugerencias que han servido para enriquecer el texto.

Bibliografía

- [1] Carral L, Alvarez-Feal JC, Tarrio-Saavedra J, Rodriguez Guerreiro MJ, Fraguela JÁ. Social interest in developing a green modular artificial reef structure in concrete for the ecosystems of the Galician rías. J Clean Prod 2018;172:1881–98. doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.252.
- [2] Carral L, Camba Fabal C, Lamas Galdo MI, Rodríguez-Guerreiro MJ, Cartelle Barros JJ. Assessment of the materials employed in green artificial reefs for the galician estuaries in terms of circular economy. Int J Environ Res Public Health 2020;17:8850. doi:10.3390/ijerph17238850.
- [3] Carral L, Cartelle Barros JJ, Carro Fidalgo H, Camba Fabal C, Munín Doce A. Greenhouse gas emissions and energy consumption of coastal ecosystem enhancement programme through sustainable artificial reefs in Galicia. Int J Environ Res Public Health 2021;18:1909. doi:10.3390/ijerph18041909.

