

## **SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF GRADED AGGREGATE AND INSULATION MATERIALS BASED IN THE USE OF MUSSEL SHELL.**

Bordello Malde, Lucía; De la Cruz López, M. Pilar; Del Caño Gochi, Alfredo; Cartelle Barros, Juan José  
Universidade da Coruña

In Galicia (NW Spain), the canning industry is an economic and social cornerstone, with great importance at both national and international spheres. This industry generates a large amount of waste shell, leading to an environmental problem difficult to solve. Particularly, taking into account the amount of generated waste, the key problem in Galicia is the mussel shell. One possibility is the valorization of the shell, turning the waste into a by-product that can be used as construction material. Two deterministic, MIVES-based models for assessing sustainability of two unbound applications are presented in this paper. The first is related to the use of mussel shell as graded aggregate, and the second for using it as soundproofing and thermal insulation material. The model includes the three usual sustainability fields: environmental, social, and economic. The results contribute information for help in the design of sustainable constructions incorporating those materials.

**Keywords:** Sustainability; MIVES; Construction; Mussel shell; Graded aggregate; Insulation materials.

## **EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE ZAHORRAS CORREGIDAS Y MATERIALES DE AISLAMIENTO, EN BASE AL USO DE CONCHAS DE MEJILLÓN.**

En Galicia el sector conservero constituye un pilar económico y social, de gran importancia en los ámbitos nacional e internacional. Esta industria genera una gran cantidad de residuo de concha, que origina un problema medioambiental de difícil solución. En particular, a causa del volumen de residuo generado, el problema clave en Galicia es la concha de mejillón. Una posibilidad es valorizar la concha, transformando el residuo en un subproducto que puede ser utilizado como material de construcción. En este trabajo se presentan dos modelos deterministas, basados en el método MIVES, para realizar evaluaciones de la sostenibilidad integral de dos aplicaciones no ligadas de la concha de mejillón: zahorras corregidas y material de aislamiento térmico y acústico. Este modelo incluye los tres ámbitos habituales de la sostenibilidad: medioambiental, social y económico. Los resultados resultan de utilidad para el diseño sostenible de construcciones que incorporen este tipo de materiales.

**Palabras clave:** Sostenibilidad; MIVES; Construcción; Concha de mejillón; Zahorras corregidas; Materiales de aislamiento.

Correspondencia: M. Pilar de la Cruz López - [pcruz@udc.es](mailto:pcruz@udc.es); Alfredo del Caño Gochi - [alfredo@udc.es](mailto:alfredo@udc.es)

Agradecimientos: Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto "Valorización de las conchas de bivalvos gallegos en el ámbito de la construcción" (Cód. 00064742 / ITC-20133094), financiado por el CDTI dentro del programa FEDER Innterconecta, con la co-financiación de fondos europeos FEDER. Los autores agradecen sinceramente el apoyo de los profesores del Grupo de Construcción (GCons) de la Universidade da Coruña y de los profesionales de las empresas Extraco, Serumano y Galaicontrol.

This work has been developed within the framework of the project "Valorización de las conchas de bivalvos gallegos en el ámbito de la construcción" (Valorization of Galician bivalve shell in the construction sector; Code 00064742 / ITC-20133094), funded by CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial) under the FEDER-Innterconecta Program, and co-financed with European Union ERDF funds. We wish to express our most sincere thanks to the professors of the Construction Group of the University of A Coruña (GCons) and the professionals of the firms Extraco, Serumano and Galaicontrol.

## 1. Introducción y Objetivos.

Galicia es uno de los mayores productores de bivalvos del mundo, generando unas 200.000 toneladas de bivalvos al año, con envíos a vertedero del orden de las 80.000 toneladas de conchas. Esto supone un gran impacto ambiental. Una posible solución es su conversión en subproducto para su uso como árido en la construcción, en aplicaciones no ligadas, sin uso de conglomerantes. Una cantidad considerable de autores han investigado las aplicaciones en la construcción de materiales de este tipo, pero la práctica totalidad de las publicaciones encontradas se refieren a aplicaciones ligadas, como es el caso de Falade (1995), Yang, Yi y Leem (2005), Osarenwindu y Olusola (2006), Ballester et al. (2007), Yang et al. (2010), Muthusamy y Sabri (2012), Eo y Yi (2015), Carro et al. (2015) o González et al. (2015) entre otros. Estas publicaciones se centran en el estudio de las propiedades de hormigones y morteros de cemento, tanto en fresco como tras el endurecimiento, con sustituciones parciales de áridos de concha de ostra, bigaro, berberecho y mejillón.

En cuanto a aplicaciones no ligadas, al margen de algunas experiencias de empleo de conchas de vieira en la construcción de caminos forestales en el Reino Unido, los autores no han encontrado más trabajos que el de Ohimain, Basse y Bawo (2009), para determinar el uso que las comunidades locales nigerianas le dan a las conchas marinas. Entre las múltiples aplicaciones se incluyen algunas no ligadas, en caminos y cunetas.

En todo caso, tanto para aplicaciones ligadas como no ligadas, todos estos estudios están esencialmente orientados al estudio de las propiedades mecánicas y químicas de los materiales en los cuales se realiza la sustitución. No existe investigación sobre el comportamiento de estos materiales con respecto a su sostenibilidad global, teniendo en cuenta no sólo los aspectos medioambientales, sino también los sociales y económicos (United Nations 1987, 1992). Todo lo más que los autores han podido encontrar son estudios de análisis de ciclo de vida meramente ambiental para estudiar la sostenibilidad ambiental la obtención de carbonato de calcio por medio de calcinación de conchas de mejillón, para su uso, entre otras cosas, como filler (Iribarren 2010, Iribarren et al. 2010). Al margen de que ello supone el uso en aplicaciones ligadas, este tipo de sub-producto no resulta interesante medioambientalmente, debido a que la calcinación supone altos consumos de energía y combustibles fósiles, mientras que la línea que aquí se analiza supone el empleo de áridos de concha de mejillón con tratamientos térmicos cortos y de baja temperatura, meramente orientados a eliminar la materia orgánica, que suponen un impacto medioambiental mucho menor que la calcinación, a gran distancia.

Esta comunicación se basa en la evaluación de la sostenibilidad integral teniendo en cuenta aspectos ambientales, sociales y económicos, y establece un análisis comparativo del nivel de sostenibilidad de dos aplicaciones no ligadas de áridos de concha de mejillón tratada: zhorras corregidas y materiales de aislamiento. Como se ha anticipado, se denominan no ligadas porque el material se usa tal cual, sin combinarse con conglomerante de tipo alguno, por contraposición a su inclusión, por ejemplo, en hormigones y morteros. La comparación se realiza, en primer lugar, entre zhorras que tienen un determinado porcentaje de concha de mejillón y zhorras naturales convencionales y, en segundo lugar, entre una capa de aislante térmico-acústico en base a concha de mejillón y otra de parecida capacidad aislante, a base de arcillas expandidas.

## 2. Metodología Empleada. Método MIVES con Análisis de Ciclo de Vida.

El método utilizado se basa en la técnica MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible) consistente en una combinación de técnicas basadas en árboles de requerimientos (Figura 1), funciones de valor, y el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic*

*Hierarchy Process*: AHP), usado como ayuda para establecer los pesos de los diferentes parámetros del modelo de evaluación de la sostenibilidad (Gómez et al. 2012, de la Cruz et al. 2015).

Las funciones de valor permiten transformar variables cualitativas y cuantitativas, expresadas en diferentes unidades, a una misma unidad, denominada valor o índice de satisfacción. Para las funciones de valor continuas se ha usado la Ecuación (1):

$$V_i = \frac{1 - e^{-m_i \left( \frac{P_i - P_{i,\min}}{n_i} \right)^{A_i}}}{1 - e^{-m_i \left( \frac{P_{i,\max} - P_{i,\min}}{n_i} \right)^{A_i}}} \quad (1)$$

En la cual  $P_i$  es el valor que toma el indicador  $i$  para la alternativa que se está evaluando, que se va a asociar a un valor o índice de satisfacción  $V_i$  entre 0 y 1.  $P_{i,\min}$  y  $P_{i,\max}$  son los valores mínimo y máximo que puede tomar  $P_i$  a efectos de la evaluación, y que se asocian a índices de satisfacción mínimo y máximo (0 y 1).  $A_i$ ,  $n_i$ , y  $m_i$  son factores de forma utilizados para generar funciones de valor cóncavas, convexas, en forma de S o de línea recta. Estas geometrías permiten considerar no linealidades en la evaluación, lo cual implica diferentes niveles de exigencia. En el caso de variables discretas las funciones de valor tienen forma escalonada.

Por otro lado, el Índice de Sostenibilidad global se calcula mediante el sumatorio ponderado, realizado en base al árbol de requerimientos (Figura 1).

Finalmente, los indicadores de sostenibilidad empleados se corresponden con un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ambiental, económico y social, tal como se puede observar en el árbol de la Figura 1, en el que se combina el método MIVES con el ACV (véase de la Cruz et al. 2015).

### 3. Modelos de Evaluación.

#### 3.1. Introducción. Límites del Análisis de Ciclo de Vida.

Debido a que se trata de aplicaciones no ligadas, ha sido posible concebir dos modelos de evaluación que comparten el mismo árbol de requerimientos, válido para los dos tipos de producto: ahorras y aislante térmico-acústico. Dicho de otro modo, estos dos modelos tienen los mismos indicadores con los mismos pesos (mismo árbol), pero las funciones de valor son diferentes para el modelo de ahorras y para el del aislante.

El árbol aquí presentado es completo, en el sentido de que incluye indicadores cuyo valor es el mismo para el producto convencional y para el producto basado en concha de mejillón. Esto exige un mayor trabajo de recopilación de datos y desarrollo. A cambio de ello se consigue una herramienta más útil y versátil, que se puede emplear para comparar otros productos en los que no se dé la circunstancia mencionada de igualdad de valores de parámetros, permitiendo evaluar la sostenibilidad de cualquier solución constructiva no ligada, simplemente haciendo variar algunos parámetros de las funciones de valor.

De todas formas, la calificación de "árbol completo" no debe malinterpretarse. Por un lado, no es nada práctico, cuando no imposible, establecer modelos con listados interminables de indicadores, muchos de los cuales apenas influyen sobre los resultados de la evaluación, por tener un peso irrelevante. En este sentido, de entre los múltiples indicadores de sostenibilidad existentes, se ha realizado una selección de indicadores en función de su

relevancia real en el caso que nos ocupa. Por otro lado, hoy en día es imposible obtener datos sobre determinados indicadores que, consecuentemente, no se pueden incluir en modelo alguno. Desafortunadamente, ni la literatura científica, ni las bases de datos de ACV (EcolInvent, Ecobaudat, US EPA, entre otras), ni las empresas y asociaciones de fabricantes consultados, disponen de determinados datos. Aun así, los modelos usados son muy completos, mucho más que los que se suelen encontrar en publicaciones científicas.

En todo ACV hay que definir unos límites temporales del ciclo de vida, y en este caso se ha realizado un análisis cuna a puerta, que es el análisis más frecuente realizado por la empresa que vende un determinado material o sistema constructivo. Para un material convencional, como es el caso de los áridos, la cuna se suele situar en la cantera. Esta es la primera agresión al medio ambiente cuando, en plena naturaleza, se introduce maquinaria y explosivos para extraer material. En cuanto a la concha de mejillón, a diferencia de cuando el bivalvo se usa para propósitos alimentarios, la cuna no comienza en la batea, sino cuando se acaba de hacer la evisceración y las conchas se acumulan para llevarlas a la empresa que las va a procesar, preparar y vender para su uso como sub-producto (alimentación animal o árido de construcción, por ejemplo) (Bordello et al. 2015).

Por otro lado, el ACV aquí presentado tiene su final en la puerta correspondiente al momento en el cual el árido convencional o de bivalvo se expiden para su uso como material de construcción.

### **3.2. Árbol de Requerimientos.**

La Figura 1 refleja el árbol usado en este caso. Los indicadores a valorar se incluyen en el extremo derecho de dicha figura. Los ramales del árbol agrupan estos indicadores, de derecha a izquierda, siguiendo la clasificación que se puede observar en dicha figura. En este caso hay cuatro niveles: requerimientos, criterios, riesgos e indicadores. Los requerimientos son los habituales en estos casos: ambiental, social y económico.

El pilar o requerimiento medioambiental (R1) consta de siete criterios: uso de recursos materiales y energéticos (C1); vertidos (C2) y emisiones (C3) generados tanto en el proceso de extracción y producción de materias primas como en el de fabricación; impacto sobre ecosistemas (C4); gestión ambiental (C5); uso del suelo (C6), referido a la superficie necesaria para acopio; y residuos (C7), entendido esto último como balance entre generación y consumo de los mismos.

Con respecto al pilar o requerimiento económico (R2) se consideran, por un lado, los costes directos (C8) y, por otro lado se incluye un criterio de distribución de valor (C9), mediante el cual se tiene en cuenta la posible reducción de coste en las empresas conserveras, como consecuencia de la reducción del volumen de sus residuos, al usarse el subproducto en el seno de un sistema constructivo.

Es muy frecuente que el tratamiento del requerimiento social (R3) sea el más débil, debido a la falta de datos y a la dificultad de generarlos; hasta cierto punto esto se mezcla, a veces, con falta de concienciación y de estudios previos que establezcan adecuados fundamentos metodológicos. Sin embargo, la actual situación planetaria hace necesario un tratamiento que vaya más allá de lo que se ha hecho hasta ahora; además, en este trabajo el ámbito social puede establecer diferencias relevantes entre alternativas.

Los criterios sociales considerados son, por un lado, empleo y trabajadores (C10), a efectos de generación de empleo; además, aquí toma cierta importancia el fomento de la inclusión laboral de la mujer, ya que el sector conservero ocupa un porcentaje de mano de obra femenina mayor que el de la construcción. Se evalúa también la calidad del empleo, a efectos de nivel salarial y temporalidad de los contratos, la siniestralidad del sector y la

formación ofrecida a los trabajadores. Un criterio diferenciador, en este caso en contra del material de bivalvo, es la ausencia de legislación y normativa para el uso del producto (C12), ya que la legislación y normativa en vigor no cubre la utilización de dicho sub-producto. Otro criterio está relacionado con el uso local de los productos (C14); en este sentido hay que decir que sólo se contempla el uso local de la concha de mejillón. Finalmente, se han incluido indicadores sociales similares a los establecidos en el Anejo 13 de la Instrucción española de Hormigón Estructural EHE-08 (Aguado et al. 2012), agrupados en un criterio (Ciudadanos: C11) relacionado con la información al ciudadano, el interés de la obra para el mismo y la aceptación social del producto, así como un criterio relacionado con la aplicación de resultados de proyectos de I+D+i (Innovación: C13).

Figura 1: Árbol de requerimientos

REQ.	CRITERIOS		RIESGOS		INDICADORES		
AMBIENTAL (R1)	Uso de recursos (C1)	18,1%	Consumo de Recursos (K1)	40%	Consumo de material (I1)	100%	
			Consumo energético (K2)	60%	Total Energía consumida (I2)	33,3%	
					% Energía Renovable (I3)	66,7%	
	Vertidos (C2)	12,5%	Eutrofización (K3)	66,7%	Emisiones equivalentes de Fosfatos (I4)	100%	
			Acidificación (K4)	33,3%	Emisiones eq. de SO <sub>2</sub> (I5)	100%	
	Emisiones (C3)	36,3%	Calentamiento Global (K5)	40%	Emisiones eq. de CO <sub>2</sub> (I6)	100%	
			Niebla de verano (K6)	16%	Emisiones eq. de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (I7)	100%	
			Reducción capa de ozono (K7)	24%	Reducción capa de ozono Pt (I8)	100%	
			Contaminación Acústica (K8)	12%	Emisiones sonoras (I9)	100%	
			Olor (K9)	8%	Olor (I10)	100%	
	Ecosistemas (C4)	17,7%	Alteración de hábitats (K11)	100%	Alteración de hábitats (I11)	100%	
	Gestión Ambiental (C5)	1,8%	Certificaciones de las empresas productoras (K12)	100%	Certificaciones ISO9000, 14000, EMAS (I12)	100%	
	Uso del suelo (C6)	4,5%	Uso del suelo (K13)	100%	Superficie afectada (I13)	100%	
	Residuos (C7)	9,1%	Generación de RSU (K14)	65%	Cantidad Generada de RSU (I14)	100%	
Consumo de residuos (K15)			35%	Uso de materiales reciclados (I15)	100%		
ECONÓMICO (R2)	28,00%	Costes (C8)	80%	Costes directos (K16)	100%	Precio de venta (I16)	100%
		Distribución de valor (C9)	20%	Influencia de industrias aporte (K17)	100%	Reducción en costes de producción de las conservas (I17)	100%
SOCIAL (R3)	Empleo y trabajadores (C10)	59%	Desempleo (K18)	59%	Generación de empleo (I18)	70%	
			Calidad del empleo (K19)	15%	Fomento de la inclusión laboral de la mujer (I19)	30%	
					Temporalidad (I20)	70%	
			Siniestralidad (K20)	30%	Medidas voluntarias de S y S adicionales a las reglamentarias (I22)	20%	
					Accidentes laborales (I23)	80%	
	Formación (K21)	5%	Formación de los trabajadores (I24)	100%			
	Ciudadanos (C11)	4%	Información e interés (K22)	30%	Elaboración de una página web pública de información sobre la obra (I25)	30%	
					Declaración de la obra como de interés general por la Administración (I26)	70%	
			Aceptación social (K23)	70%	Aceptación social del producto (I27)	100%	
	Legislación y normativa (C12)	4%	Ausencia de legislación (K24)	70%	Leyes, RD, Reglamentos, normas sobre uso de productos (I28)	100%	
Innovación (C13)	14%	Innovación (K25)	100%	Aplicación de resultados de proyectos de I+D+i (I29)	100%		
Local (C14)	19%	Riqueza Local (K26)	100%	Uso de productos locales (I30)	100%		

### 3.3. Establecimiento de Pesos y Funciones de Valor.

Cada indicador y ramal del árbol están ponderados según su importancia o peso con respecto a los demás indicadores o ramales dentro de un ramal. Por otro lado, cada indicador tiene asignada una determinada función de valor. Ponderaciones y funciones de valor se han realizado por consenso de un grupo de expertos. En el caso de las ponderaciones se ha utilizado puntuación directa cuando se trataba de pocas variables (tres o cuatro) y había consenso, y AHP para el resto.

**Tabla 1: Modelo de aislamiento térmico y acústico. Parámetros para las FV continuas.**

Indicador	Parámetros					Características	
	$X_{max}$	$X_{min}$	P	K	C	Geometría	Tendencia
Consumo Mat. Aislante	0	100	1	0.01	90	Lineal	D
Total Energía	30	400	3.24	0.5	192.8	Forma S	D
Energía Renovable	100	0	2.84	0.87	50	Forma S	C
Fosfatos eq.	3E-3	0.1	3	0.59	0.0515	Forma S	D
SO <sub>2</sub> eq.	0.01	0.25	3.55	0.5	0.1	Forma S	D
CO <sub>2</sub> eq.	1	40	3	0.5	20.5	Forma S	D
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0	0.02	3.01	0.5	0.01	Forma S	D
Destrucción capa ozono	0	2E-6	3	0.5	1E-6	Forma S	D
RSU	0	10	3.09	0.9	3.2	Forma S	D
Materiales reciclados	100	0	1	0.5	3	Convexa	C
Precio venta	1	10	3	0.5	5.5	Forma S	D
Empleo	1	0.3	2	1	0.3	Forma S	C
Temporalidad	0	100	3.99	0.27	45	Forma S	D

Nota: C = creciente y D = decreciente, tanto para esta tabla como para las restantes.

**Tabla 2: Modelo de aislamiento térmico y acústico. Parámetros para las FV discretas.**

Indicador	Valores					Características
	V1	V2	V3	V4	V5	Tendencia
Emisiones sonoras	1	0.8	0.6	0.2	0	D
Olor	1	0.5	0	X	X	D
Alteración hábitats	1	0.5	0	X	X	D
ISO 9000, 14000, EMAS	0	0.7	1	X	X	C
Superficie acopio vertido	0	0.6	1	X	X	C
Costes conserveras	0	0.2	0.5	1	X	C
Inclusión laboral mujer	0	0.5	1	X	X	C
Nivel salarial	0	0.6	1	X	X	C
Medidas seguridad	0	0.6	1	X	X	C
Accidentes	0	0.5	1	X	X	C
Formación trabajadores	0	0.5	1	X	X	C
Página web pública	1	0	X	X	X	D
Obra interés general	1	0	X	X	X	D
Aceptación social	0	0.5	1	X	X	C
Leyes, RD, reglamentos	0	0.6	1	X	X	C
Métodos innovadores	0	1	X	X	X	C
Materiales locales	0	0.15	0.5	0.8	1	C

Nota: El nº de posibles respuestas varía entre 2 y 5 para los distintos indicadores. Se han considerado 5 respuestas genéricas (V1 a V5), asociadas a respuestas concretas.

**Tabla 3: Modelo de zavorra corregida. Parámetros para las FV continuas.**

Indicador	Parámetros					Características	
	$X_{max}$	$X_{min}$	P	K	C	Geometría	Tendencia
Consumo Zavorra	0	1	1	0.01	1	Lineal	D
Total Energía	150	700	2	0.5	425	Cóncava	D
Energía Renovable	100	0	2.84	0.5	50	Forma S	C
Fosfatos eq.	2.5E-3	1.5	3	0.5	0.75	Forma S	D
SO <sub>2</sub> eq.	0.03	2	3	0.5	1.34	Cóncava	D
CO <sub>2</sub> eq.	0	400	3.07	0.67	200	Forma S	D
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.1	4E-3	2.37	0.9	0.1	Cóncava	C
Destrucc. capa ozono	0	1E-4	3	0.5	1E-4	Cóncava	D
RSU	50	150	3	0.5	50	Forma S	D
Materiales reciclados	100	0	1	0.5	3	Convexa	C
Precio venta	2.5	50	2.5	0.5	26.25	Forma S	D
Empleo	1	0.3	2	1	0.3	Forma S	C
Temporalidad	0	100	3.99	0.27	45	Forma S	D

**Tabla 4: Modelo de zavorra corregida. Parámetros para las FV discretas.**

Indicador	Valores					Características
	V1	V2	V3	V4	V5	Tendencia
Emisiones sonoras	1	0.8	0.6	0.2	0	D
Olor	1	0.5	0	X	X	D
Alteración hábitats	1	0.5	0	X	X	D
ISO 9000, 14000, EMAS	0	0.7	1	X	X	C
Superficie acopio vertido	0	0.6	1	X	X	C
Costes conserveras	0	0.2	0.5	1	X	C
Inclusión laboral mujer	0	0.5	1	X	X	C
Nivel salarial	0	0.6	1	X	X	C
Medidas seguridad	0	0.6	1	X	X	C
Accidentes	0	0.5	1	X	X	C
Formación trabajadores	0	0.5	1	X	X	C
Página web pública	1	0	X	X	X	D
Obra interés general	1	0	X	X	X	D
Aceptación social	0	0.5	1	X	X	C
Leyes, RD, reglamentos	0	0.6	1	X	X	C
Métodos innovadores	0	1	X	X	X	C
Materiales locales	0	0.15	0.5	0.8	1	C

En la Figura 1 se pueden observar los resultados del proceso seguido para los pesos, y en las tablas 1 a 4 se muestran los diferentes parámetros de las funciones de valor de los dos modelos. En todos los casos se ha tenido en cuenta lo reflejado en la escasa literatura existente que aborda este asunto, y se han realizado razonamientos que soportasen los pesos y funciones de valor establecidos. Así, por ejemplo, con respecto a los pesos de los tres requerimientos o pilares de la sostenibilidad, parece lógico que los aspectos medioambientales tengan más importancia que los sociales, y que éstos estén por encima de los económicos. Si se destruye el medio ambiente no habrá vida, y por lo tanto no habrá actividad social ni económica. Por su parte, las diferencias sociales pueden llegar a afectar seriamente la actividad económica, aunque sólo sea porque llegue un momento en que el poder adquisitivo de la mayoría de la población no pueda permitir más consumo que el de la mera supervivencia. Finalmente, no deberían existir grandes diferencias entre los tres pesos, pues ello iría en contra del concepto de desarrollo sostenible definido en la Cumbre de Río, en la cual se considera que todos estos pilares son importantes (United Nations, 1992). Tras tener todo esto en cuenta, el proceso de consenso entre expertos llevó a los siguientes pesos: 42% para el requerimiento ambiental, 30% para el social y 28% para el económico.

### **3.4. Valores de Entrada a los Modelos.**

Para estimar los valores que toman los indicadores medioambientales se ha tenido en cuenta lo reflejado en publicaciones científicas y en bases de datos de materiales de construcción y análisis de ciclo de vida (BUNBR 2015, Ecoinvent 2015), así como catálogos internacionales de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP; *Environmental Product Declarations*: EPD) de productos de construcción (entre otras fuentes, EPD Norway 2015).

Para los indicadores sociales se ha tenido en cuenta, además, información procedente de informes sectoriales proporcionados por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Se han usado informes diversos, como son las tablas input-output, la Encuesta sobre Innovación en las Empresas, realizada por el INE, o la información generada por la Central de Balances del Banco de España. Se ha tenido en cuenta la clasificación CNAE (Clasificación Nacional de Actividades Económicas) de la actividad considerada.

Para estimar los indicadores económicos se ha utilizado la Base de Precios Oficial de la Construcción de Galicia (Fundación ITEGa 2015) y la base de precios BEDEC (ITeC 2015).

Los datos de entrada relativos a la concha de mejillón se basan en lo reportado por Bordello et al. (2015), que han analizado, a efectos de sostenibilidad, el proceso de valorización de la concha de mejillón consistente en un proceso de lavado, tratamiento térmico, secado y molienda, tras el cual el sub-producto resultante puede usarse con los propósitos aquí aludidos, o con otros.

Toda la información generada ha sido revisada y contrastada con un grupo de expertos del sector de la construcción. En las tablas 5 y 6 se incluyen las unidades de medida y los valores que toman los indicadores para cada alternativa (convencional y con concha mejillón). Los valores de entrada que se usan son los más habituales en las fuentes consultadas y, por tanto, los resultados de índices de sostenibilidad que se obtienen se pueden considerar como valores modales.

## **5. Resultados y Discusión.**

### **5.1. Aislante Térmico-Acústico**

En este caso se han evaluado dos alternativas cuyas características aislantes son muy parecidas: la gravilla de mejillón y la arcilla expandida, que también se usa en edificaciones proyectadas con arreglo a sostenibilidad, por ser un material de procedencia totalmente



natural, no tóxico ni nocivo. A partir de ahora, cuando se hable de opción o material “convencional” nos referiremos a la arcilla expandida. Este material es un árido ligero usado como aislante térmico, fabricado a partir de arcilla natural, mediante un proceso térmico a 1200 °C. El proceso de fabricación comienza en las canteras, donde la arcilla es triturada, secada y granulada, pasando luego al horno, en el cual se funde y se produce la combustión de la materia orgánica que hay en la arcilla. Es entonces cuando se produce la fase de expansión. Las arcillas expandidas son utilizadas como árido ligero en el sector de la construcción debido a sus propiedades térmicas y acústicas, su resistencia al fuego, su resistencia a compresión, su estabilidad a lo largo del tiempo y su condición de material natural, ya que la mayoría de los aislantes térmicos actuales son productos químicos. Por otro lado, la arcilla expandida tiene una conductividad térmica similar a la de la gravilla de mejillón.

Por su parte la concha de mejillón, en sus diferentes granulometrías, proporciona un aislamiento térmico en función del aire ocluido entre las partículas de material, que será mayor cuanto mayor tamaño tengan las partículas. Así, sería más beneficioso emplear como material aislante el material granular de mayor tamaño. Sin embargo la opción de emplear concha entera como material aislante ha sido descartada, ya que la empresa suministradora no aplica tratamiento térmico a esta variedad y su empleo causará problemas debidos a la presencia de materia orgánica. Por tanto, se considera la gravilla de cáscara de mejillón como alternativa a analizar.

La unidad funcional (UF) adoptada en este caso se define como la masa de material aislante que proporciona una resistencia térmica  $R$  de  $1 \text{ m}^2\text{K/W}$ , y se ha calculado de acuerdo con la fórmula  $UF=R \cdot k \cdot A \cdot \rho$  (Pargana et al. 2014), en la cual  $R$  representa la resistencia térmica de referencia, que en este caso ya hemos anticipado que se toma con valor de  $1 \text{ m}^2\text{K/W}$ ,  $k$  la conductividad térmica medida en  $\text{W}/(\text{m.K})$ ,  $\rho$  la densidad del producto aislante en  $\text{kg}/\text{m}^3$  y  $A$  el área del aislante, que en este caso, a efectos de la comparación, se toma con valor de  $1 \text{ m}^2$ .

Esta unidad funcional proporciona información acerca de la cantidad de material necesario para proporcionar una resistencia térmica determinada. Las características de ambos materiales se muestran en la Tabla 7.

Aplicando el modelo aquí presentado, el Índice de Sostenibilidad global (ISg) de la arcilla expandida resulta ser de 0.35, y el de la gravilla de mejillón 0.71. En ambos casos se trata de aislantes que, adecuadamente usados y dimensionados pueden suponer ahorros de hasta un 80% en calefacción o climatización, pero la alternativa que posee un mayor ISg es la gravilla de mejillón, con un valor de ISg que dobla al de la arcilla expandida.

Separadamente por pilares de la sostenibilidad, la concha de mejillón supera a la opción convencional en los tres. En el económico es en el que se observa una mayor distancia respecto al material convencional. Esto se debe a que sus indicadores son ambos favorables para la gravilla de mejillón: es más económica y además contribuye al ahorro en la gestión de residuos por parte de las conserveras. La ventaja de la concha de mejillón en el ámbito social se debe principalmente a la consideración de los efectos sobre las conserveras (sector puramente local y femenino), la aplicación de resultados de proyectos de I+D+i, y la aceptación social que suelen tener los productos eco-amigables (siendo este producto más eco-amigable que el convencional). Con respecto al pilar ambiental, las diferencias a favor del nuevo material son más reducidas. Aunque las emisiones y vertidos son ligeramente mayores para la concha mejillón, las diferencias a su favor se basan en el hecho de no explotar recursos naturales, no alterar el ecosistema y consumir residuos (la propia concha de mejillón).

**Tabla 5: Valores de entrada al modelo de aislamiento térmico y acústico.**

Indicador	Unidades/Posibles respuestas	Alternativas	
		Arcilla Exp.	Mejillón
Consumo Mat. Aislante	kg/UF (numérico)	29.7	63.84
Total Energía	MJ/UF (numérico)	327.9	33.035
Energía Renovable	% (numérico)	42.4	42.4
Fosfatos eq.	Kg-eq PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /UF (numérico)	0.00746	0.0744
SO <sub>2</sub> eq.	kg-eq SO <sub>2</sub> /UF (numérico)	0.13	0.084
CO <sub>2</sub> eq.	Kg-eq CO <sub>2</sub> /UF (numérico)	8.07	15.452
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /UF (numérico)	0.00495	0.00351
Destrucción capa ozono	Kg CFC/UF (numérico)	0.000002	0.000001
Emissiones sonoras	V1: Muy bajo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto. V5: Muy Alto	V3	V2
Olor	V1: Muy bajo. V2: Bajo. V3: Medio	V1	V2
Alteración hábitats	V1: Muy bajo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto. V5: Muy Alto	V3	V1
ISO 9000. 14000. EMAS	V1: Sin las básicas. V2: Básicas. V3: Básicas+EMAS	V2	V2
Superficie acopio vertido	V1: Sin. V2: Menor 20%. V3: Mayor 20%	V1	V2
RSU	kg/UF (numérico)	2.05	4.4
Materiales reciclados	% (numérico)	0	100
Precio venta	€/UF (numérico)	7.6835	1.136
Costes conserveras	V1: Nulo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto	V1	V3
Empleo	Personas/€ (numérico)	0.636	0.73
Inclusión laboral mujer	V1: Sin. V2: Iniciat./Col.. V3: Iniciat./Col./Plan Estratégico	V1	V2
Temporalidad	%(Temporales/Indef.) (numérico)	70	70
Nivel salarial	V1: Salario Mínimo. V2: Medio. V3: Alto	V2	V2
Medidas seguridad	V1: Sin. V2: Algunas. V3: Abundantes	V1	V1
Accidentes	V1: Bajo. V2: Medio. V3: Alto	V2	V2
Formación trabajadores	V1: Menor 10 h/año. V2: 12-20 h/año. V3: Mayor 20 h/año	V2	V2
Página web pública	V1: Si. V2: No	V1	V1
Obra interés general	V1: Si. V2: No	V2	V2
Aceptación social	V1: Baja. V2: Media. V3: Alta	V2	V3
Leyes. RD. reglamentos	V1: Ausencia. V2: Poca. V3: Mucha	V3	V2
Métodos innovadores	V1: No. V2: Si	V1	V1
Materiales locales	V1: 0-10%. V2: 10-30%. V3: 30-50%. V4: 50-80%. V5: Muy 80-100%	V5	V5

Nota. Iniciat.: iniciativas. Col.: colaboraciones. Indef.: indefinidos.

**Tabla 6: Valores de entrada al modelo de zahorra corregida.**

Indicador	Unidades/Posibles respuestas	Alternativas	
		Convencional	Biovalvo-30
Consumo Zahorra	t (numérico)	1	0.3
Total Energía	GJ/m <sup>3</sup> (numérico)	173.95	277
Energía Renovable	% (numérico)	42.4	42.4
Fosfatos eq.	Kg-eq PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /t (numérico)	0.0043	0.353
SO <sub>2</sub> eq.	kg-eq SO <sub>2</sub> /t (numérico)	0.038	0.356
CO <sub>2</sub> eq.	Kg-eq CO <sub>2</sub> /t (numérico)	6.303	77.024
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /t (numérico)	0.0059	0.0206
Destrucción capa ozono	Kg CFC/t (numérico)	0	0.000004
Emissiones sonoras	V1: Muy bajo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto. V5: Muy Alto	V3	V3
Olor	V1: Bajo. V2: Medio. V3: Alto	V1	V1
Alteración hábitats	V1: Muy bajo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto. V5: Muy Alto	V3	V3
ISO 9000. 14000. EMAS	V1: Sin las básicas. V2: Básicas. V3: Básicas+EMAS	V2	V2
Superficie acopio vertido	V1: Sin. V2: Menor 20%. V3: Mayor 20%	V1	V2
RSU	kg/t (numérico)	97.9	89.23
Materiales reciclados	% (numérico)	0	30
Precio venta	€/t (numérico)	7.207	9.995
Costes conserveras	V1: Nulo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto	V1	V2
Empleo	Personas/€ (numérico)	0.61	0.61
Inclusión laboral mujer	V1: Sin. V2: Iniciat./Col.. V3: Iniciat./Col./Plan Estratégico	V1	V2
Temporalidad	%(Temporales/Indef.) (numérico)	70	70
Nivel salarial	V1: Salario Mínimo. V2: Medio. V3: Alto	V2	V2
Medidas seguridad	V1: Sin. V2: Algunas. V3: Abundantes	V1	V1
Accidentes	V1: Bajo. V2: Medio. V3: Alto	V2	V2
Formación trabajadores	V1: Menor 10 h/año. V2: 12-20 h/año. V3: Mayor 20 h/año	V2	V2
Página web pública	V1: Si. V2: No	V1	V1
Obra interés general	V1: Si. V2: No	V2	V2
Aceptación social	V1: Baja. V2: Media. V3: Alta	V1	V2
Leyes. RD. reglamentos	V1: Ausencia. V2: Poca. V3: Mucha	V3	V3
Métodos innovadores	V1: No. V2: Si	V1	V1
Materiales locales	V1: 0-10%. V2: 10-30%. V3: 30-50%. V4: 50-80%. V5: Muy 80-100%	V1	V2

**Tabla 7: Características principales de la arcilla expandida y la concha de mejillón.**

	Arcilla Expandida	Concha de Mejillón
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	270	570
Conductividad térmica (W/(m.K))	0.100	0.112
Unidad funcional (kg)	29.7	63.84

## 5.2. Modelo de Zahorra Corregida.

En este segundo caso se ha comparado la sostenibilidad de una zahorra convencional frente a otra corregida mediante la sustitución de un determinado porcentaje de árido natural por sub-producto de concha de mejillón, para aplicaciones de construcción de zanjas y rellenos drenantes. Se han evaluado dos alternativas: una zahorra ZA20 y el mismo material corregido con un 30% de gravilla de concha de mejillón, que vamos a denominar ZA20-30%CM. Para conseguir el cumplimiento de la cantidad máxima de finos de la zahorra se requiere un 30% de gravilla de mejillón. La zahorra corregida cumpliría las especificaciones granulométricas para una zahorra ZA20 sin necesidad de un reprocesado completo del material.

La unidad funcional para el modelo de zahorra artificial es la tonelada de material, y al aplicar el modelo aquí presentado se obtienen ISg's, respectivamente, de 0.51 y 0.56 para las zahorras ZA20 y ZA20-30%CM. Por tanto, existe muy poca diferencia entre ambas, habiendo una diferencia muy ligera a favor de la concha de mejillón. Por otro lado, con sustituciones diferentes la ventaja puede ser para el material convencional.

Por pilares, la alternativa con concha de mejillón es más ventajosa desde el punto de vista ambiental y social, principalmente por las mismas razones que las referidas al hablar del modelo de aislamiento, comentado en la sección anterior. No obstante, si aumentásemos el porcentaje de sustitución el pilar ambiental se vería penalizado, en parte debido a las mayores emisiones de fabricación del sub-producto de concha de mejillón, en comparación con las de un árido convencional. Por su parte, el índice parcial para el pilar económico es favorable al material convencional. La razón de ello es que la concha de mejillón tratada posee un precio más elevado que el de una zahorra convencional.

## 6. Conclusiones.

En lo relativo a consumo de energía y emisiones contaminantes, la valorización de la concha de mejillón requiere un procesamiento más exigente que el necesario para la obtención de áridos naturales convencionales. Por tanto, sin tener en cuenta otros indicadores ambientales, las soluciones con concha de mejillón suponen mayores impactos. Sin embargo, teniendo también en cuenta indicadores de uso del suelo (canteras de arcilla o de árido natural), alteración de hábitats (por las mismas razones relacionadas con las canteras) y uso de residuos (reciclaje, evitándose vertido de residuos al medio), la situación se equilibra, y el material con concha de mejillón puede llegar a ser ventajoso. En el caso de las arcillas expandidas resulta ser muy ventajoso, debido al proceso térmico a altas temperaturas necesario para producir arcilla expandida. En cuanto a indicadores sociales, la sostenibilidad del nuevo material se ve incrementada. Esto se debe fundamentalmente a la consideración de los efectos sobre las empresas conserveras (sector puramente local y con mano de obra esencialmente femenina), la aplicación de resultados de proyectos de I+D+i y la aceptación social que deben tener las soluciones con concha de mejillón frente a las convencionales, de la misma forma que sucede con otros productos procedentes total o

parcialmente de reciclaje. La dimensión económica depende directamente de la cantidad de material sustituida por árido con concha de mejillón, y de los precios de los materiales.

Todo ello, en este caso, indica que el uso de sub-producto de concha de mejillón para zahorras corregidas puede ser ventajoso, y que el caso de ser comparado con algunos materiales aislantes, como es el caso de las arcillas expandidas, la ventaja es enorme.

También es muy grande la ventaja de este sub-producto con respecto a cualquier sub-producto obtenido por calcinación (productos de los cuales no se habla en esta comunicación, por no usarse en aplicaciones no ligadas), ya que los impactos ambientales reportados por Iribarren (2010) e Iribarren et al. (2010) son muchísimo más altos.

## 7. Referencias

- Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Gómez, D., & Josa, A. (2012). Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 138(2), 268-276.
- Ballester, P., Mármol, I., Morales, J., & Sánchez, L. (2007). Use of limestone obtained from waste of the mussel cannery industry for the production of mortars. *Cement and concrete research*, 37(4), 559-564.
- Bordello L., de la Cruz M.P., & del Caño A. (2015). Valorization of mussel shell for its use as an aggregate in unbound applications: life-cycle sustainability indicators. *19th International Congress on Project Management and Engineering (02-009-1/02-009-11)*, organizado por AEIPRO-IPMA (Asociación Española de Ingeniería de Proyectos – International Project Management Association) y celebrado en Granada (España) del 15 al 17 de julio de 2015.
- BUNBR (2015). Ökobaudat. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BUNBR; Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear; Alemania). Base de datos para la evaluación del ciclo de vida de materiales de construcción. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://www.oekobaudat.de/>
- Carro, D., González B., Martínez, C., Martínez, F., Seara, S., Rodríguez R. (2015). Desing and properties of mortar with seashells fine aggregates. *ICBBM 2015 - First International Conference on Bio-based Building Materials (289-294)*. Clermont Ferrand, France, June 2015. ISBN: 978-2-35158-154-4.
- de la Cruz, M.P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., & Cartelle J.J. (2015). Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part I: the MIVES – Monte Carlo method. In M.S. García-Cascales, J.M. Sánchez-Lozano, A.D. Masegosa, & C. Cruz-Corona (Eds), *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency* (Chapter 4, pp. 69-106). USA: IGI-Global.
- Ecoinvent (2015). Asociación sin ánimo de lucro creada por la ETH (Escuela Politécnica Federal de Zúrich) y el Gobierno Federal Suizo (Ecoinvent). The ecoinvent Database. Base de datos para la evaluación del ciclo de vida. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://www.ecoinvent.org/database/database.html>
- Eo, S., & Yi, S. (2015). Effect of oyster shell as an aggregate replacement on the characteristics of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 67(15), 833-842.
- EPD Norway (2015). Fundación noruega creada por la Confederación de Empresas Noruegas y la Federación Noruega de Industrias de la Construcción (EPD Norway). The ecoinvent Database. Base de datos con Declaraciones Ambientales de Producto.

- Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://www.epd-norge.no>.
- Falade, F. (1995). An investigation of periwinkle shells as coarse aggregate in concrete. *Building and Environment*, 30(4), 573-577.
- Fundación ITEGa (2015). Fundación Instituto Tecnológico de Galicia. Base de Precios Oficial de la Construcción de Galicia. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://www.presupuesta.com>.
- González B., Carro, D., Martínez, F., Martínez, C., & Seara, S. (2015). Effects of seashell aggregates in concrete properties. *ICBBM 2015 - First International Conference on Bio-based Building Materials* (376-382). Clermont Ferrand, France, June 2015. ISBN: 978-2-35158-154-4.
- Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M. P., & Josa, A. (2012). Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos - El método MIVES. En A. Aguado (Ed.), *Sostenibilidad y Construcción* (pp. 385-411). Madrid, España: Asociación Científico-Técnica del Hormigón.
- Iribarren, D. (2010). Life Cycle Assessment of mussel and turbot aquaculture. Application and insights. Doctoral Thesis. Available in: <http://dspace.usc.es/handle/10347/2812>.
- Iribarren, D., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2010). Implementing by-product management into the Life Cycle Assessment of the mussel sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1219-1230.
- ITeC (2015). Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. Base de Precios BEDEC. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>.
- Muthusamy, K., & Sabri, N.A. (2012). Cockle shell: A potential partial coarse aggregate replacement concrete. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 1(4), 260-267.
- Ohimain, E. I., Basse, S., & Bawo, D. D. S. (2009). Uses of sea shell for civil construction works in coastal Bayelsa State, Nigeria: A waste management perspective. *Research Journal of Biological Science*, 4(9), 1025-31.
- Osarenwind, J.O., & Aworo, A.O. (2009). The potential use of periwinkle shell as coarse aggregate for concrete. *Advanced Materials Research*, 62-64, 39-43, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.62-64.39.
- Pargana, N., Pinheiro, M.D., Silvestre, J.D., & de Brito, J. (2014). Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy and Buildings*, 82, 466-481.
- United Nations (1987) *Our Common Future (Brundtland Report)*. United Nations World Commission on Environment and Development (WCED). Disponible en línea en: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
- United Nations (1992). *Rio Declaration on Environment and Development*. Río de Janeiro, Brasil: United Nations Conference on Environment and Development (UNCED).
- Yang, E., Kim, M., Park, H., & Yi, S. (2010). Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 758-765.

Yang, E., Yi, S., & Leem, Y. (2005). Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties. *Cement and Concrete Research*, 35(11), 2175-2182.