

## **SUSTAINABILITY IN THE PRODUCTION OF GRANITE AGGREGATE IN THE NORTH-WEST OF SPAIN: ENERGY CONSUMPTION AND CO<sub>2</sub> EMISSIONS**

Mel Fraga, José<sup>1</sup>; Del Caño Gochi, Alfredo<sup>2</sup>; De la Cruz López, M.Pilar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ministerio de Defensa, <sup>2</sup> Universidad de La Coruña

Aggregates are present in all construction projects, and they are the main component of mortars, concrete and road surface. For adequately characterizing energy consumption and carbon dioxide emissions involved in their production, a set of data (production, fuel and electricity consumption in 2010-2011) from ten quarries located in the North-West of Spain has been analysed. Results indicates an energy consumption range of 0,021-0,043 GJ/t and an emission range of 0,0013-0,0027 tCO<sub>2</sub>/t. These results are of interest for its use in the sustainability assessment of the construction systems previously mentioned, according to the Spanish reality.

**Keywords:** *Aggregate; Quarry; Energy consumption; CO<sub>2</sub> emissions; Spain*

## **SOSTENIBILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE ÁRIDO GRANÍTICO EN EL NOROESTE DE ESPAÑA: CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub>**

Los áridos están presentes en todo proyecto de construcción, y en particular son el componente mayoritario de morteros, estructuras de hormigón y pavimentos viales. Para caracterizar el consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono asociadas a su producción, se han analizado los registros estadísticos de producción, consumo eléctrico y de gasóleo de una decena de canteras situadas en el noroeste de España, correspondientes a los años 2010 y 2011. Los resultados obtenidos indican un consumo energético de 0,021-0,043 GJ/t y unas emisiones de 0,0013-0,0027 tCO<sub>2</sub>/t. Estos datos son de interés para el uso en la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas constructivos antedichos, ajustada al caso particular de España.

**Palabras clave:** *Áridos; Canteras; Consumo energético; Emisiones CO<sub>2</sub>; España*

## 1. Introducción

El 99% de los áridos empleados en construcción son de origen natural, mientras que la pequeña fracción restante procede del reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) o de escorias generadas en otros procesos industriales (Asociación Nacional de Fabricantes de Áridos, ANEFA, 2013).

Los métodos de producción de áridos difieren en el modo de explotación de los yacimientos, según se trate de materiales sin consolidar (graveras, donde se emplean únicamente medios mecánicos) o de bancos de roca masiva (canteras, en las que se recurre a voladuras con explosivos previas al uso de equipos mecánicos). A partir de este punto ambos tipos de instalaciones tienen un funcionamiento similar, transportando el material mediante camiones o cintas transportadoras hasta una planta de tratamiento en la que suceden diferentes etapas de trituración, clasificación y lavado, en función del tamaño y la calidad requerida al producto final. Habitualmente una planta produce áridos de diferentes tamaños o granulometrías, según la demanda existente en la zona, siendo más elevado el precio a medida que aumenta el grado de molienda.

Los equipos móviles empleados son del mismo tipo que los habituales en movimientos de tierras (palas cargadoras, dumpers, camiones, etc.), accionados por gasóleo. Los sistemas integrados en la planta (cintas, machacadoras, cribas, etc.) utilizan energía eléctrica para su funcionamiento, o alternativamente gasóleo (véanse ANEFA, 2013b; Tiktin, 1998). No es habitual que se empleen otros suministros energéticos al margen de los anteriores.

Las explotaciones de áridos afectan al medio ambiente en diferentes modos: por agotamiento de recursos naturales, por alteración o contaminación de aguas superficiales o subterráneas, por generación de ruido, vibraciones y polvo, por impacto visual, afección a fauna y flora, etc. (ANEFA, 2013b). Esta comunicación se centra en el consumo de energía y la emisión de CO<sub>2</sub> en las diferentes etapas del proceso, como primera parte de un trabajo en curso que supone realizar modelos de evaluación de la sostenibilidad que tengan también en cuenta otros aspectos medioambientales, económicos y sociales.

En otros sectores, como en la producción de cemento o acero, se necesitan instalaciones industriales de gran tamaño y complejidad técnica, lo que ocasiona un número reducido de competidores y un precio elevado de sus productos, que hace rentables los transportes a largas distancias. Las instalaciones de producción de áridos son más sencillas, operan con menos personal y explotan yacimientos abundantes en toda la geografía española. Existe un gran número de explotaciones, condicionado por las circunstancias del transporte. Éste se realiza casi en su totalidad por carretera (ANEFA, 2013b), y sus costes pueden llegar a superar el coste de producción del árido. Transportes a distancias mayores de 50 km no son habituales (pueden suponer menos del 5% de los casos) debido a su baja rentabilidad, por lo que el mercado de áridos es predominantemente local.

## 2. Objetivos

Los áridos son el componente mayoritario del hormigón (del orden del 70-80% en peso, según la dosificación). Aunque su impacto ambiental es mucho menor que el del cemento, no puede despreciarse a la hora de estudiar el ciclo de vida del hormigón. Se han consultado diversas publicaciones relacionadas con el impacto ambiental de productos y materiales de construcción, en las que se elaboraban inventarios dentro de los cuales se incluían áridos de diferentes tipos. Flower y Sanjayan (2007) estudian las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al sector del hormigón en Australia, donde incluyen estimaciones para la producción de áridos graníticos y basálticos. En Nisbet et al. (2010) se realiza un estudio del sector del hormigón en Estados Unidos, mencionando también la producción de áridos en varias canteras. Alcorn (2003) y Hammond y Jones (2011) ofrecen

inventarios ambientales de múltiples productos, referidos respectivamente a Nueva Zelanda y el Reino Unido. La intención de este trabajo es presentar un análisis realizado con respecto al consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> asociados a la extracción y tratamiento de arenas y gravas, empleando datos reales obtenidos de una serie de canteras graníticas situadas en la zona noroeste de España.

Los resultados obtenidos pretenden servir como parte del inventario ambiental necesario para la elaboración de nuevos modelos de estudio de la sostenibilidad estructural, basados en técnicas y herramientas de Análisis del Ciclo de Vida.

### **3. Metodología**

#### **3.1. Planteamiento General**

El presente estudio centra la atención en cuatro aspectos identificados como responsables de la mayor parte de estos consumos y emisiones:

1. El empleo de combustibles fósiles (gasóleo) en la maquinaria móvil de extracción y movimiento de tierras.
2. El empleo de energía eléctrica en las instalaciones de transporte interno, trituración, clasificación y lavado.
3. El empleo de explosivos para la realización de voladuras controladas.
4. El ciclo de vida de los equipos e instalaciones de producción.

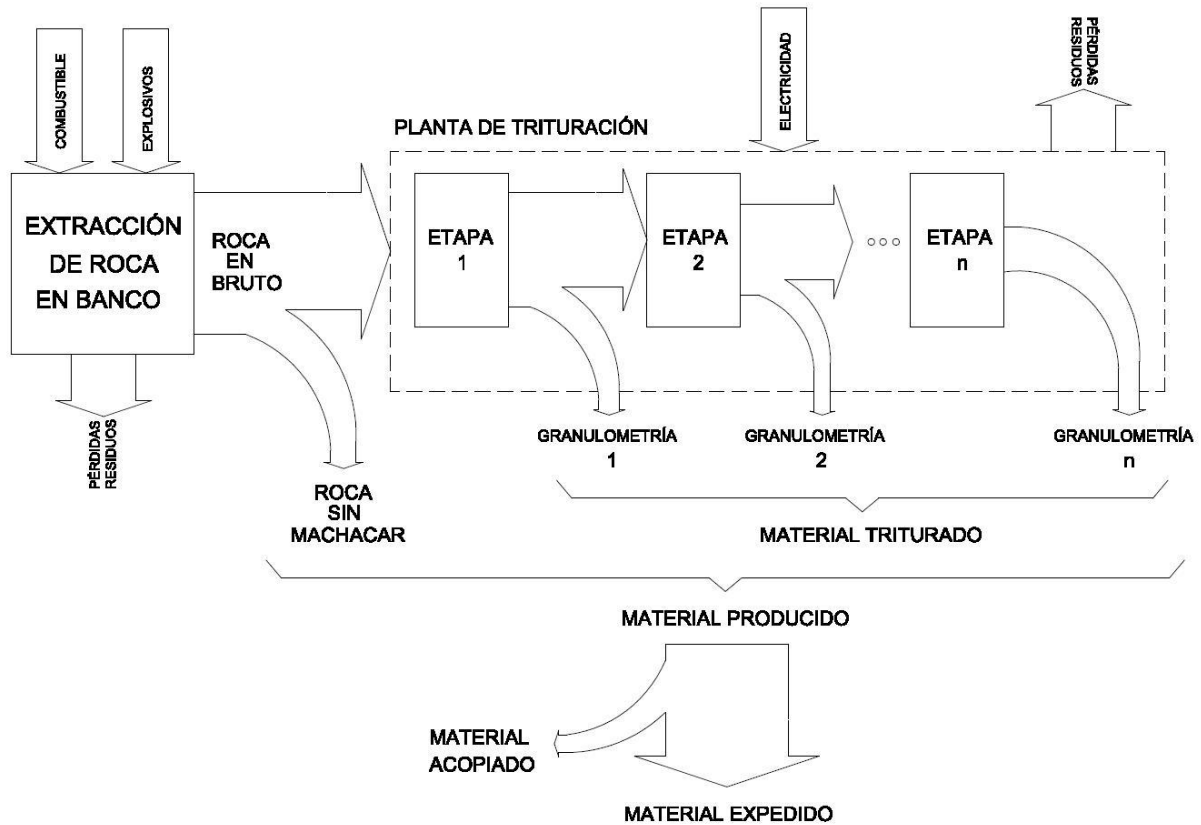
Se cuenta con los datos de producción y consumos de una decena de canteras situadas en la zona noroeste de España, pertenecientes a un mismo grupo empresarial, correspondientes a los años 2010 y 2011. Con ellos, y aplicando los esquemas de cálculo que se indicarán a continuación, se determinan los parámetros de emisión y consumo por tonelada de material producido. Estos valores son comparados con otros obtenidos en la bibliografía especializada.

La información disponible incluye, para cada una de las canteras, la cantidad total de gasóleo consumido por sus equipos móviles internos, la energía eléctrica consumida, la cantidad de material producido, y la de material triturado. Se entiende por material producido a todo el expedido por la cantera, mientras que el material triturado contabiliza aquel que ha pasado por la planta de molienda. Ambas cantidades pueden diferir debido a que (i) se puedan vender piezas pétreas de grandes dimensiones (por ejemplo para escolleras) o (ii) que no se llegue a expedir dentro del año considerado la totalidad del árido triturado.

Las voladuras con explosivos son realizadas por una subcontrata especializada, por lo que no se dispone de información relativa al consumo de explosivos. Como referencia para estimar este consumo se utiliza el dato extraído de Cementos Portland Valderribas (CPV), 2013, referido a canteras de caliza para la fabricación de cemento.

El análisis realizado tiene por límites la salida del material expedido por la cantera a sus clientes. La incidencia de los procesos de transporte de los áridos será estudiada al analizar el funcionamiento de una planta de hormigón preparado. La figura 1 representa un diagrama de flujo simplificado del proceso a estudiar, indicando las entradas, salidas y fronteras del mismo.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de producción de áridos en una cantera



### 3.2. Formulación para el Cálculo Energético

La energía consumida en la producción de árido se reparte entre la utilización de combustible (gasóleo) en los equipos móviles, la energía eléctrica para la planta de producción, la utilización de explosivos en las voladuras y el ciclo de vida de las instalaciones productivas. Se tiene también en cuenta la pequeña contribución del transporte de combustible y explosivo hasta la cantera.

El gasóleo y el explosivo intervienen en todo el material producido en la cantera (puesto que es necesario arrancarlo todo del banco), mientras que la energía eléctrica sólo incide sobre el material triturado (como el empleado para la producción de hormigón). Para reflejar adecuadamente esta situación en la determinación del consumo energético, se plantea el cálculo de la energía específica por unidad de masa de árido, del modo siguiente. Por un lado:

$$E_{\text{específica árido}} = [(E_{\text{combustible}} + E_{\text{explosivos}} + E_{\text{transportes}}) / M_{\text{producido}}] + (E_{\text{electricidad}} / M_{\text{triturado}}) + E_{\text{CV}} \quad (1)$$

Siendo:

$$E_{\text{combustible}} = C_{go} \cdot VCN_{go} \cdot FEP_{go} \quad (2)$$

Donde  $C_{go}$  es la cantidad, en toneladas, de gasóleo consumido,  $VCN_{go}$  el valor calorífico neto en MJ/t del gasóleo según Unión Europea (2007), y  $FEP_{go}$  el factor de energía primaria del gasóleo (que tiene en cuenta el coste energético de la extracción y procesado industrial de combustibles fósiles, adoptándose el valor de  $FEP_{go} = 1,085$  extraído de Furuholt (1995). Por otro lado:

$$E_{\text{explosivos}} = M_{\text{producido}} \cdot FC_{\text{explosivo}} \cdot FE_{\text{explosivo}} = C_{\text{exp}} \cdot FE_{\text{explosivo}} \quad (3)$$

Donde  $M_{producido}$  es la cantidad total de material procesado (igual a la cantidad total de material extraída del banco),  $FC_{explosivo}$  es el factor de consumo del explosivo (determinado a partir de CPV (2013), con un valor de  $1,57 \cdot 10^{-4} t_{explosivo}/t_{material\ extraído}$ ) y  $FE_{explosivo}$  es el factor energético del explosivo (4,80 MJ/kg según Maxam (2013)). Por su parte:

$$E_{transportes} = E_{t\ combustible} + E_{t\ explosivo} = (C_{go} \cdot D_{go} + C_{exp} \cdot D_{exp}) \cdot IE_t \quad (4)$$

Donde  $C_{go}$  y  $C_{exp}$  son las cantidades transportadas de gasóleo y explosivo, respectivamente, y  $D_{go}$  y  $D_{exp}$  son las distancias de transporte por carretera correspondientes. En ambos casos se considera transporte por carretera; para el gasóleo su punto de origen es una refinería, desde la que se toma una distancia media de 300 km. En el caso del explosivo se supone una distancia media de 600 km.  $IE_t$  es la intensidad energética del transporte en camión, adoptándose el valor de 1,47 MJ/t·km procedente de Pérez y Monzón (2008), incrementado en un 3%, de acuerdo con lo indicado por Eriksson et al. (1996), para incluir el impacto del ciclo de vida de los vehículos. En otro orden de cosas:

$$E_{electricidad} = W \cdot FEP_e \quad (5)$$

Donde  $W$  es la energía eléctrica consumida y  $FEP_e$  el factor de energía primaria asociado a la electricidad, determinado en Mel et al. (2013), tomándose un  $FEP_e = 6,20$  GJ / MWhe. Finalmente:

$$E_{CV} = 0,05 \cdot [(E_{combustible} + E_{explosivo}) / M_{producido} + E_{electricidad} / M_{triturado}] \quad (6)$$

Donde se incluyen los costes energéticos de construcción, mantenimiento y desmantelamiento de la planta y los equipos empleados en ella, a falta de datos que permitan una aproximación de mayor precisión. No se incluye el transporte de combustibles y explosivos dado que ya se contabiliza dentro de la intensidad energética antes mencionada.

La energía específica obtenida es un valor medio para cualquier árido obtenido de una misma cantera, ya que durante el desarrollo metodológico anterior no se han tenido en cuenta en ningún momento las diferencias entre granulometrías de los diferentes materiales expedidos. En realidad la implicación energética de las fracciones finas (arenas) es mayor que la de las fracciones gruesas (gravas), debido al mayor nivel de molienda, que implica mayor número de etapas en la planta y un mayor consumo de energía eléctrica. A los efectos del presente estudio, se considera que la aproximación realizada cuenta con la suficiente precisión, teniendo en cuenta que al hormigón se incorporan tanto áridos finos como gruesos.

A modo de resumen, se recogen en la tabla siguiente los diferentes parámetros de cálculo citados previamente, con alusión a la referencia de la que proceden.

**Tabla 1. Parámetros empleados en los cálculos energéticos**

Concepto		Referencia
Valor Calorífico Neto gasóleo (GJ/t)	43,00	Unión Europea (2007)
Factor Energía Primaria gasóleo	1,085	Furuholt (1995)
Factor Energía Primaria energía eléctrica 2010 (GJ/MWhe)	6,20	Mel et al. (2013)
Consumo de explosivo ( $t_{explosivo}/t_{material\ extraído}$ )	0,000157	CPV (2013)
Factor energético explosivo (MJ/kg)	4,80	Maxam (2013)

Intensidad energética transporte en camión (MJ/t·km)	1,470	Pérez y Monzón (2008)
		Eriksson et al. (1996)
Distancia de transporte gasóleo (km)	300	Estimación propia
Distancia de transporte explosivos (km)	500	Estimación propia

### 3.3. Formulación para el Cálculo de las Emisiones de CO<sub>2</sub>

La determinación de las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> que corresponden a la producción de áridos se lleva a cabo de un modo análogo al ya seguido en 3.2 para el estudio del consumo energético. Se detallan a continuación las expresiones y parámetros empleados, omitiendo la repetición de explicaciones ya incluidas en el apartado anterior. Por un lado:

$$G_{\text{específica árido}} = [(G_{\text{combustible}} + G_{\text{explosivo}} + G_{\text{transporte}}) / M_{\text{producido}}] + (G_{\text{electricidad}} / M_{\text{triturado}}) + G_{\text{CV}} \quad (7)$$

$$G_{\text{combustible}} = C_{\text{go}} \cdot FG_{\text{go}} \cdot FG_{\text{Pgo}} \quad (8)$$

Donde  $FG_{\text{go}}$  es el factor de emisión del gasóleo, de valor 3,182 tCO<sub>2</sub>/t<sub>go</sub> según Unión Europea (2007), y  $FG_{\text{Pgo}}$  el factor de emisión asociado a la producción del gasóleo, que supone un 10% de las emisiones generadas durante el consumo del mismo, según Furuholt (1995). Por otro lado:

$$G_{\text{explosivo}} = M_{\text{producido}} \cdot FC_{\text{explosivo}} \cdot FG_{\text{explosivo}} = C_{\text{exp}} \cdot FG_{\text{explosivo}} \quad (9)$$

Donde  $FG_{\text{explosivo}}$  es el factor de emisión de CO<sub>2</sub> del explosivo, adoptando un valor de 0,180 tCO<sub>2</sub>/t<sub>explosivo</sub>, según Flower y Sanjayan (2007). Por su parte:

$$G_{\text{transportes}} = G_{\text{t combustible}} + G_{\text{t explosivo}} = (C_{\text{go}} \cdot D_{\text{go}} + C_{\text{exp}} \cdot D_{\text{exp}}) \cdot IG_{\text{t}} \quad (10)$$

Siendo  $IG_{\text{t}}$  el factor de emisión asociado al transporte por carretera, tomado de Pérez y Monzón (2008), tomándose un valor base de 14,04 gCO<sub>2</sub>/t·km, e incrementándose dicho valor en un 3%, de acuerdo con lo propuesto por Eriksson et al. (1996), para tener en cuenta las emisiones durante el ciclo de vida de los vehículos. En otro orden de cosas:

$$G_{\text{electricidad}} = W \cdot FG_{\text{e}} \quad (11)$$

Donde  $FG_{\text{e}}$  es el factor de emisión del sistema eléctrico español, determinado en Mel et al. (2013), tomándose un valor de 0,301 tCO<sub>2</sub>/MWhe. Por último:

$$G_{\text{CV}} = 0,05 \cdot [(G_{\text{combustible}} + G_{\text{explosivo}}) / M_{\text{producido}} + G_{\text{electricidad}} / M_{\text{triturado}}] \quad (12)$$

Se resumen en la tabla 2 los parámetros considerados en este apartado.

**Tabla 2. Parámetros empleados en los cálculos de emisiones**

Concepto		Referencia
Factor de emisión del gasóleo (tCO <sub>2</sub> /tgasóleo)	3,182	Unión Europea (2007)
Factor de emisión en la producción de gasóleo	1,10	Furuholt (1995)
Factor de emisión electricidad 2010 (tCO <sub>2</sub> /MWhe)	0,301	Mel et al. (2013)
Factor emisiones explosivo (tCO <sub>2</sub> /t)	0,180	Flower y Sanjayan (2007)
Factor emisión transporte en camión (kgCO <sub>2</sub> /t·km)	0,980	Pérez y Monzón (2008) Eriksson et al. (1996)

### 3.4. Origen de los Datos

Por razones de confidencialidad no se hace referencia en este documento a la empresa que ha suministrado la información sobre sus explotaciones ni a la localización de las mismas. Se identifica cada instalación de producción a través de un código numérico. Todas las canteras se sitúan en el noroeste peninsular, y en ellas se extraen materiales de origen granítico.

Los datos aportados por la empresa incluyen, para cada cantera, el consumo total de gasóleo ( $C_{go}$ ), la energía eléctrica consumida ( $W$ ), el material total producido ( $M_{producido}$ ) y el material total triturado ( $M_{triturado}$ ), durante los años 2010 y 2011.

## 4. Resultados

### 4.1. Consumo de Energía Primaria

De la forma indicada en 3.2, se han calculado las energías primarias específicas asociadas a combustible, explosivo, transporte, electricidad y ciclo de vida de la instalación, por tonelada de material. Asimismo se obtiene la energía específica total, como sumatorio de los términos anteriores, presentándose en la tabla 4.

**Tabla 4. Consumo de energía primaria total por tonelada de árido producido**

Cantera	E <sub>específica total</sub> (GJ/t)	
	2010	2011
1	0,0321	n.d
2	0,0329	0,0347
3	0,0427	0,0419
4	0,0210	0,0229
5	0,0328	0,0376
6	0,0362	0,0414
7	0,0378	0,0420
8	0,0322	0,0304
9	n.d	n.d
10	n.d.	0,0266

Debe de señalarse que los resultados obtenidos son aplicables, en general, al árido que haya sido triturado, sin diferenciación por granulometría, dado que se incluye la energía eléctrica.

El consumo toma valores entre 0,021 y 0,0427 GJ/t. El promedio para los valores obtenidos es de 0,0335 GJ/t en 2010 y 0,0347 GJ/t en 2011. La media total de todos los valores calculados es de 0,0341 GJ/t.

A la vista de los resultados obtenidos, se ha adoptado un rango de valores para la energía primaria en producción de áridos graníticos de 0,021 a 0,043 GJ/t, estimándose como valor más probable el de 0,034 GJ/t.

La figura 2 muestra la contribución de cada uno de los aportes energéticos estudiados al consumo total de cada cantera. La tónica general es que el gasóleo y la electricidad suponen más del 90% del consumo energético de las canteras, repartido de una forma más

o menos equitativa entre ambos, con una ligera preponderancia del gasóleo. Bajo las hipótesis asumidas para su estimación, la importancia de los explosivos es pequeña, y la del transporte a cantera de explosivos y combustible es despreciable.

Existen pequeñas variaciones interanuales dentro de la misma cantera, que en el caso más desfavorable alcanzan el 12,5%. Con la información disponible no es posible identificar adecuadamente la causa de dicha variabilidad, aunque se considera probable que no obedezca a un único factor sino a una suma de ellos. En todo caso, dada su relativamente reducida magnitud no se considera que este margen de variación deba invalidar los resultados obtenidos.

#### 4.2. Emisiones de Dióxido de Carbono

Análogamente, siguiendo el método expuesto en 3.3, se han determinado las emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de árido producido. La tabla 5 recopila los resultados obtenidos. El rango de emisiones de CO<sub>2</sub> en las diferentes canteras estudiadas muestra una amplitud semejante a la detectada en el caso de las emisiones energéticas. Las emisiones toman valores entre 1,31 y 2,66 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>árido</sub>. Las media anuales son de 2,08 y 2,32 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>árido</sub>, y la media de todos los valores calculados es de 2,15 kgCO<sub>2</sub>/t<sub>árido</sub>. En este caso, las variaciones interanuales de las emisiones de una misma cantera presentan diferencias menores a las observadas en los consumos energéticos y, por tanto, las variaciones registradas no invalidan los resultados obtenidos.

Figura 2. Distribución de aportes energéticos según su origen, para el año 2010

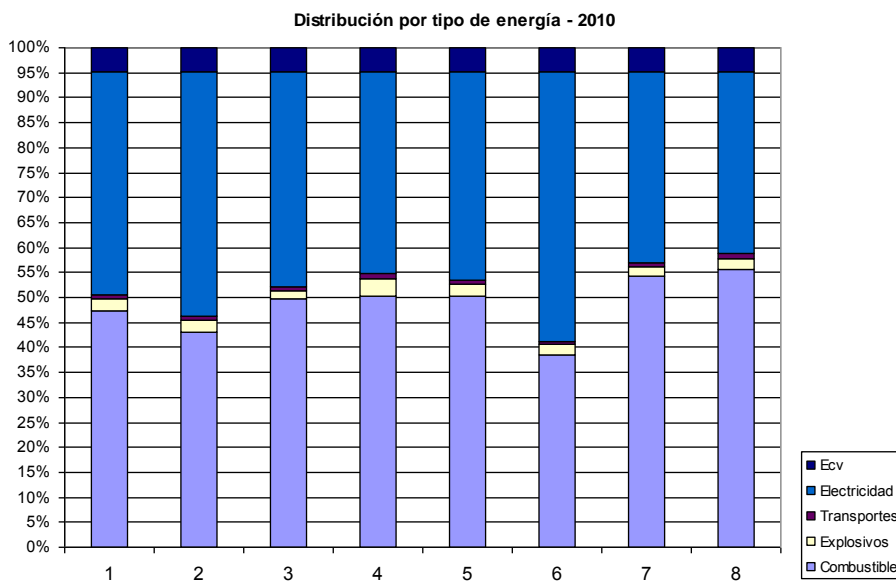


Tabla 5. Emisión de CO<sub>2</sub> total por tonelada de árido producido

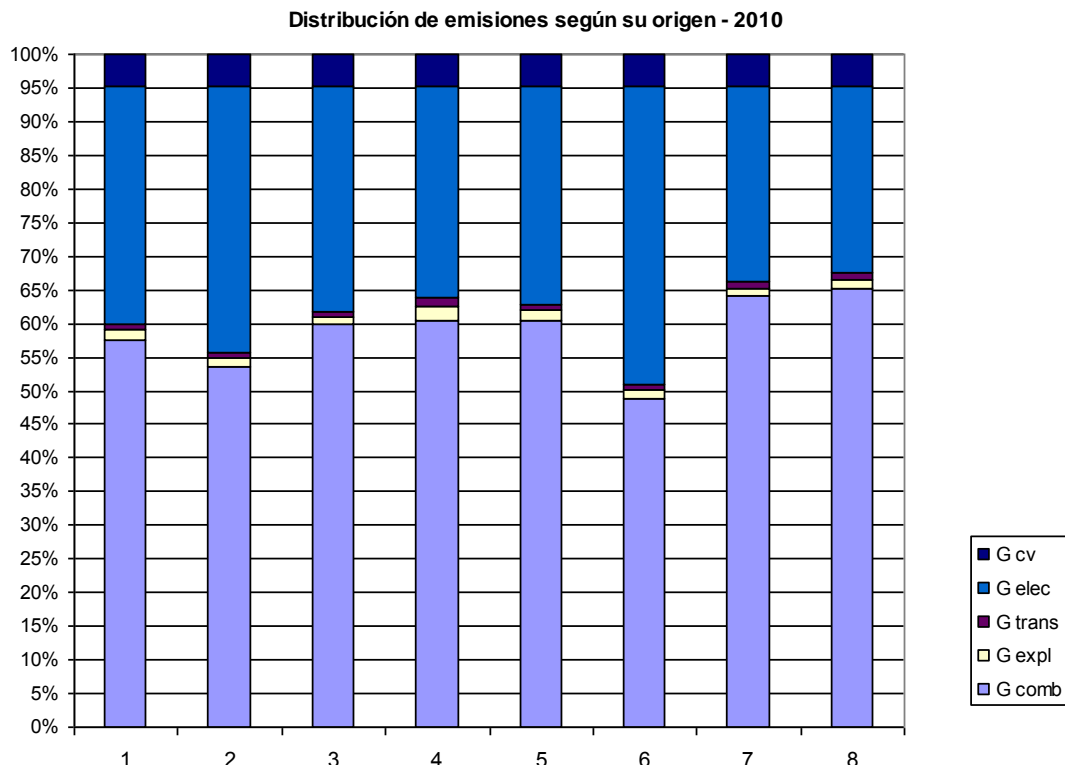
Cantera	G <sub>específico. total (tCO<sub>2</sub>/t)</sub>	
	2010	2011
1	1,98·10 <sup>-3</sup>	n.d.
2	1,99·10 <sup>-3</sup>	2,09·10 <sup>-3</sup>
3	2,66·10 <sup>-3</sup>	2,60·10 <sup>-3</sup>
4	1,31·10 <sup>-3</sup>	1,31·10 <sup>-3</sup>



5	$2,05 \cdot 10^{-3}$	$2,35 \cdot 10^{-3}$
6	$2,14 \cdot 10^{-3}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$
7	$2,40 \cdot 10^{-3}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$
8	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$2,06 \cdot 10^{-3}$
9	n.d.	n.d.
10	n.d.	$1,66 \cdot 10^{-3}$

Por otra parte, en cuanto al reparto de las emisiones según la fuente a que se atribuyen, existe un claro predominio del CO<sub>2</sub> procedente de la combustión de gasóleo, frente al achacable al consumo de energía eléctrica, que se mantiene como la segunda gran fuente. Los restantes factores tienen una importancia residual, como se observa en la figura 3.

**Figura 3. Distribución de emisiones de CO<sub>2</sub> según su origen, para el año 2010**



#### 4.3. Valores Propuestos en la Literatura

En la tabla 6 se presenta una recopilación de datos relativos al consumo energético y las emisiones de dióxido de carbono en la producción de áridos, tomados de diferentes fuentes bibliográficas.

**Tabla 6. Valores medios de consumo energético y emisión de CO<sub>2</sub> en la producción de áridos**

Concepto	E (GJ/t)	G (tCO <sub>2</sub> /t)	País	Referencia
Árido fino	-	0,0139	AUS	
Árido grueso - granito	-	0,04590	AUS	Flower y Sanjayan (2007)
Árido grueso - basalto	-	0,03570	AUS	
Árido (general)	0,1	0,0050	UK	Hammond y Jones (2008)
Árido (general)	0,083	0,0052	UK	Hammond y Jones (2013)
Arena	0,1	0,0069	NZ	
Árido fino (de río)	0,03	0,0012	NZ	Alcorn (2003)
Árido (procedente de roca)	0,06	0,0031	NZ	
Árido (general)	0,04	0,0023	NZ	
Árido (general)	0,124	-	IRE	Goggins et al. (2010)
Árido - piedra machacada	0,0738	-	USA	Nisbet et al. (2000)
Árido - arena y grava	0,0422	-	USA	

## 5. Conclusiones

La tabla 7 resume los resultados obtenidos tras el análisis de los datos disponibles. Se observa que los consumos energéticos y emisiones de dióxido de carbono de las canteras estudiadas se encuentran dentro del orden de magnitud de los indicados por la bibliografía, si bien sus valores son sensiblemente inferiores a los consultados. Los valores más próximos son los ofrecidos por Alcorn (2003).

**Tabla 7. Resumen de resultados de los cálculos realizados**

Concepto	Rango	Media	Desviación Estándar
Consumo energético (GJ/t)	0,021 – 0,043	0,034	0,0066
Emisión de CO <sub>2</sub> (tCO <sub>2</sub> /t)	0,0013 – 0,0027	0,0022	0,00042

Una de las posibles causas de esta diferencia a la baja generalizada puede encontrarse en la elevada incidencia de la energía eléctrica sobre los parámetros estudiados y el hecho de que el impacto ambiental de la generación de electricidad en España sea inferior al de otros países.

Por ejemplo, en Flower y Sanjayan (2007), se indica que el factor de emisión del sistema eléctrico empleado en el estudio es el correspondiente al estado australiano de Melbourne en 2004-2005, de valor 1,392 tCO<sub>2</sub>/MWh. Este factor es más de 4 veces superior al calculado para España en 2010. La diferencia reside en que en Melbourne el peso de la generación en centrales de carbón (la fuente de mayor emisividad) sobre el total fue del 91,3%, frente a un 16,8% en España en 2010. Además, el peso total de las energías renovables en Melbourne era del 2%, mientras que en España estas fuentes suponen más del 22% de la energía generada. Además, en España un 6% de la energía procedió de centrales nucleares, inexistentes en la región austral considerada. De esta forma, las emisiones señaladas por Flower y Sanjayan para la producción de áridos graníticos son,

aproximadamente, unas 20 veces superiores a las emisiones medias determinadas en este trabajo para las canteras estudiadas.

En cualquier caso, debe señalarse que los datos disponibles corresponden a canteras de un mismo tipo (graníticas) y situadas en una misma región. En trabajos posteriores se debería ampliar el estudio a otros tipos de cantera, así como a extracciones de áridos no procedentes de machaqueo, en los cuales cabría esperar, a priori, menores necesidades de energía. Sería también conveniente realizar un análisis que abarcase un periodo de tiempo más amplio, de modo que se identificasen con mayor precisión posibles fluctuaciones interanuales del consumo específico de energía dentro de una misma instalación, y se pudiese ligar dicha fluctuación a los factores que afectan a la producción.

El alcance del análisis realizado llega hasta la expedición del material en la cantera / planta de trituración, lo que en la terminología habitual de análisis de ciclo de vida se conoce como “de la cuna a la puerta” (cradle to gate). Como se ha indicado, a partir de este momento el árido debe ser transportado a sus puntos de consumo (por ejemplo, las plantas de hormigón preparado). Este transporte deja de ser rentable a distancias superiores a los 50 km, ya que su coste supera al del árido. Con los factores empleados en este trabajo, un transporte por carretera a 50 km añade a cada tonelada de árido, respectivamente, 0,0735 GJ y 0,0051 tCO<sub>2</sub> (valores del orden de magnitud de los resultados obtenidos para la producción del árido).

Finalmente, es conveniente señalar que los resultados obtenidos pueden permitir comparar el desempeño ambiental de las instalaciones estudiadas, si bien para hacerlo adecuadamente se necesitaría ampliar el horizonte temporal del estudio. Estos resultados no pueden resultar representativos de la totalidad del sector en nuestro país, dada la ya comentada pertenencia de todas las canteras analizadas a la misma zona geográfica y al mismo tipo de árido. Sin embargo, si se considera cumplido el objetivo inicial de este trabajo de servir como base para el posterior desarrollo de nuevos estudios relacionados con la sostenibilidad de las estructuras de hormigón y su Análisis de Ciclo de Vida, al proporcionar un perfil ambiental para el árido granítico que puede ser tomado como más representativo para las instalaciones de este tipo ubicadas en nuestro país que los ofrecidos por la bibliografía internacional.

### **Agradecimientos**

Los trabajos reflejados en esta comunicación se enmarcan en el proyecto MIVES IV, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto código BIA2010-20789-C04-02)

### **6. Referencias bibliográficas**

- Alcorn, A., (2003). Embodied energy and CO<sub>2</sub> coefficients for NZ building materials. Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington.
- Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA), (2013), Qué son los Áridos, [www.aridos.org](http://www.aridos.org), accedido 07.10.2013.
- Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA), (2013b) Explotaciones de Áridos y Medio Ambiente, [www.aridos.org](http://www.aridos.org), accedido 07.10.2013.
- Cementos Pórtland Valderrivas, (2013), Declaraciones Ambientales de las fábricas de Leona, Mataporquera, Monjos, Vallcarca, Hontoria y El Alto, años 2009 – 2011. [www.valderrivas.es](http://www.valderrivas.es) , accedido el 07.10.2013.
- Eriksson, E., Blinge, M., Lovgren, G., (1996). Life cycle assessment of the road transport sector. *The Science of Total Environment*, nº 189/190, págs. 69-76, PII: S0084-9697(96)05192-3.

- Flower, D., Sanjayan, J., (2007), Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *International Journal on Life Cycle Assessment*, vol. 12, nº 5, págs. 282-288.
- Furuholt, E.,(1995), Life cycle assessment of gasoline and diesel. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 14, págs. 251-263.
- (2010), The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland. *Energy and Buildings* vol. 42, págs.735-744.
- Hammond, G., Jones, C., (2008). Inventory of Carbon and Energy (ICE). Version 1.6. Sustainable Energy Research Team, Dept. Of Mechanical Engineering, University of Bath, [www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied](http://www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied), accedido 07.10.2013.
- Hammond, G., Jones, C., (2011). Inventory of Carbon and Energy (ICE). Version 2.0. Sustainable Energy Research Team, Dept. Of Mechanical Engineering, University of Bath, [www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied](http://www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied), accedido 07.10.2013.
- Maxam, (2013). Hojas de datos de la familia de explosivos RIOGEL, tomadas de [www.maxam.com](http://www.maxam.com) , accedido 07.10.2013.
- Mel, J., Del Caño, A., De La Cruz, P., (2013). Análisis del consumo energético y de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la construcción de estructuras de hormigón en España. *Dyna. Ingeniería e Industria*, vol. 88, nº 1, págs. 59- 67.
- Nisbet, M., VanGeem, M., Gadja, J., Marceau, M., (2000), Environmental Life Cycle Inventory of portland cement concrete. Portland Cement Association, PCA R&D Serial Nº 2137.
- Pérez, P., Monzón, A., (2008). Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión. *Observatorio Medioambiental* , nº 11, págs.127-147.
- Tiktin, J., (1998), Procedimientos Generales de Construcción – Procesamiento de Áridos, Instalaciones de Hormigonado, Puesta en Obra de Hormigón. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. ISBN: 84-7493-205-X.
- Unión Europea. Decisión 2007/589/CE de la Comisión, de 18 de julio de 2007, por la que se establecen directrices para el seguimiento y la notificación de emisiones de gases de efecto invernadero de conformidad con la Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, 31 de agosto de 2007, núm. 229, pp. 33-34.