



Viabilidad ambiental del reciclaje del yeso

Autor: Sindy Sofía Suárez Silgado

Institución: Universidad Politécnica de Cataluña

Otros autores: Xavier Roca (Universidad Politécnica de Cataluña)

Resumen

Uno de los problemas ambientales que más afectan a la sociedad es el actual cambio climático. La causa de este cambio se debe principalmente a la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI); principalmente al aumento de la concentración del dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). De acuerdo con el Quinto informe de evaluación del IPCC del año 2013 (Grupo de trabajo I), las emisiones de estos gases han aumentado, principalmente el CO₂ que es el gas de efecto invernadero más importante.

El sector industrial, especialmente la industria de la construcción, es una de las que más contribuyen a la emisión de este gas (CO₂) por su gran consumo energético (Giesekam et al., 2014). Monahan, Powell (2011) destaca que los combustibles fósiles y la manufactura del cemento, son responsables de más del 75% del incremento del CO₂ atmosférico desde la pre industria del siglo XVIII. Así mismo, Bellart Crevillen (2009) y Giesekam et al., (2014) resaltan que el sector de la construcción consume el 40% de la energía y emite un tercio de las emisiones de CO₂ a nivel mundial.

El consumo de materia prima por parte de la industria de la construcción, trae como consecuencia la generación de residuos y el consumo energético asociado a su gestión. Según Solís-Guzmán et al. (2009), la industria de la construcción genera el 35% de residuos industriales en el mundo. Estos residuos llamados Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la mayoría de los casos no son bien gestionados, y por ello se disponen gran parte en vertederos, ocupando un volumen que claramente excede, el ocupado por los residuos domésticos.

Ante la problemática ambiental del sector de la construcción mencionada anteriormente, se estudia el proceso de producción primaria y secundaria del yeso y se hace una comparación de la obtención del yeso a partir de materia prima original y a partir de materia prima reciclada teniendo en cuenta los impactos causados en las categorías calentamiento global (CO₂ eq.) y energía no renovable (MJ).

Palabras clave: reciclaje, residuos, emisiones de CO₂, consumo energético, yeso, construcción.

1. Introducción

En la Unión Europea se generan cada año más de 450 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición, constituyéndose en la más grande corriente de residuos en términos cuantitativos además de los residuos agrícolas y mineros. Concretamente en España, se producen alrededor de 35 millones de toneladas anuales de residuos de construcción y demolición (Instituto Nacional de Estadísticas, 2013). Estos residuos llamados Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la mayoría de los casos no son bien gestionados, y por ello se disponen gran parte en vertederos.

Así mismo, Zabalza Bribián et al. (2011) afirma que a nivel mundial, el trabajo civil y la construcción de edificios consumen el 60% de las materias primas extraídas de la litosfera, de este volumen los edificios representan el 24% de las extracciones globales.

Debido a esta problemática, se han dado avances a nivel internacional en materia de política y gestión ambiental. Concretamente, la Unión Europea tiene entre sus objetivos mejorar la eficiencia energética para cumplir con el Protocolo de Kioto de reducir sus emisiones globales en al menos un 20% respecto a los niveles de 1990 para el año 2020. Para esto se han elaborado normativas y planes que favorecen el desarrollo de tecnologías de bajo consumo, así como investigaciones en las que se evalúa el uso de materiales alternativos de construcción que pueden sustituir el uso de materiales vírgenes con el fin de disminuir los impactos ambientales en término de consumo energético, contaminación, generación de residuos y calentamiento global. El reciclaje y la reutilización de estos residuos pueden disminuir el uso de recursos naturales y la mejora del medio ambiente.

En estas investigaciones se ha empleado una herramienta de reconocimiento internacional llamada Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la cual permite conocer los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto.

2. Revisión bibliográfica

2.1 Problemática del efecto invernadero y del cambio climático

Efecto invernadero

El clima de la tierra depende entre otros factores del efecto invernadero, que es un fenómeno natural gracias al cual se mantiene una temperatura media constante en la tropósfera y en la superficie de la tierra. Según Rey Martínez, Velasco Gómez (2006), el efecto invernadero consiste en una pantalla de re radiación solar infrarroja creada por el dióxido de carbono (CO₂) y otros gases como el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), el ozono (O₃) y los halo carbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo) cuya consecuencia es el calentamiento global de la tierra. El problema de este fenómeno natural está en que estos gases se están incrementando, principalmente el dióxido de carbono, que es el gas más predominante por su volumen (Rey Martínez, Velasco Gómez, 2006); (Monahan Powell, 2011). Este gas representa tres cuartas partes del total y más del 90% de este es de origen energético, de esto se deduce la importancia de las políticas de eficiencia energética de limitar las emisiones de CO₂ (Rey Martínez, Velasco Gómez, 2006).

Cambio climático

El cambio climático es un hecho natural que ha existido durante toda nuestra existencia. A lo largo de 4600 millones de años el clima ha variado desde cálido a frío, pasando en ocasiones de uno a otro de forma brusca (Rey Martínez, Velasco Gómez, 2006). El cambio climático y el calentamiento global generan consecuencias negativas en la salud humana y el medio ambiente (Dombrowski, Ernst, 2014). Entre sus consecuencias se encuentra el aumento de las temperaturas atmosféricas y oceánicas, el derretimiento generalizado de la nieve y el hielo, y el aumento del nivel del mar (González Armada, 2010). El sector de la construcción contribuye al cambio climático mundial en todo su ciclo de vida (Wu et al., 2014).

2.2 Análisis del ciclo de vida

Según la norma ISO 14040, el ACV se define como una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto (o servicio) mediante un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, una evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas y una interpretación de los resultados de las fases de inventario e impacto en términos de los objetivos del estudio.

En el estudio del ACV existen 4 fases de acuerdo con la ISO 14040:

- a) Definición del objetivo y el alcance.
- b) Análisis del inventario.
- c) Evaluación del impacto ambiental.
- d) Interpretación.

2.3 Materiales de construcción

De acuerdo con Zabalza Bribián et al. (2011) en Europa la extracción mineral per cápita destinada para la construcción llega a 4,8 toneladas por habitante al año, lo cual es 64 veces el porcentaje de peso de una persona, destacando la necesidad de trabajar por la desmaterialización de la construcción.

En España cada metro cuadrado habitable de una construcción convencional requiere un total de 2,3 toneladas de más de 100 tipos de material (Zabalza Bribián et al. 2011). Esta información permite tener una idea de la problemática asociada al uso de los materiales de construcción y a su potencial agotamiento.

Dentro de todos los materiales de construcción existentes, en este estudio se evalúa el yeso, ya que a pesar de que ha sido uno de los primeros materiales empleados en construcción, éste ha presentado un desarrollo tecnológico muy importante (Guillén Viña 2005).

Producción del yeso

El proceso de obtención del yeso se puede resumir en los siguientes pasos según Bustillo Revuelta et al. (2005) y Fernández C. (2010):

- Extracción del mineral: El mineral destinado a fabricación es arrancado mediante voladura, triturado y cribado a un tamaño adecuado y regular para posteriormente ser transportado a fábrica.
- Trituración o cribado: A la entrada de fábrica, el yeso es triturado y cribado de forma que las piedras de yeso tengan unas dimensiones máximas que permitan su deshidratación en los hornos. El tamaño máximo varía dependiendo del tipo de horno, aunque no suele superar los 20 mm. Este yeso formado esencialmente por sulfato cálcico dihidratado y convenientemente preparado para la cocción, se denomina yeso crudo.
- Cocción: La cocción del yeso natural se realiza por vía seca o por vía húmeda. En la cocción por vía seca se contemplan dos tipos de situaciones, según la cocción se realice o no en contacto directo con los gases de combustión. Uno u otro tipo de diseño tiene como resultado productos de yesos diferentes que tienen su base en el semihidrato β (temperatura inferior a los 200° C) o bien en la anhidrita insoluble o sobrecocido, cuando el horno trabaja a temperaturas superiores a 350 ° C. El combustible utilizado es fuel oil, o más recientemente gas natural.
- Restauración: La fase de restauración se lleva a cabo cuando ha finalizado la fase de explotación, con el fin de mitigar los efectos negativos e integrar la zona afectada al medio ambiente natural. Esta fase es fundamental y necesaria para acelerar la regeneración del espacio afectado ya que de manera natural los procesos de regeneración son demasiado lentos (Gremi d` Arids de Catalunya, 2011).

2.4 Residuos de construcción y demolición

Entre los RCD se incluyen una variada serie de materiales como productos cerámicos, residuos de hormigón, material asfáltico y en menor medida otros componentes como madera, vidrio, yeso y plástico (Yuan et al., 2011).

En la Tabla 1 se especifica el porcentaje de RCD generados en España.

Tabla 1 Residuos generados en el sector de la construcción (Instituto Nacional de Estadísticas, 2013).

Residuos generados por tipo	No peligrosos (miles de toneladas)	Peligrosos (miles de toneladas)	Total (miles de toneladas)
Total	32526,7	154,9	32681,6
Residuos minerales	31808,7	132,4	31941,1
Residuos mezclados	226,2	0	226,2
Metálicos	193,8		193,8
Madera	133,4	0,5	133,9
Plásticos	83,1		83,1
Papel y cartón	67,4		67,4
Químicos	5,8	19,4	25,2
Equipos electrónicos y vehículos desechados	2,3	2,2	4,5
Otros	2,8	0,2	3
Vidrio	2,1	0,2	2,3
Caucho	0,5		0,5
Animales y vegetales	0,3		0,3
Sanitarios y biológicos	0,2	0	0,2

Aunque el porcentaje de los residuos de yeso es de 0,2% con respecto a la composición total de los RCD (Morán del Pozo, 2011), la cantidad de estos residuos generados anualmente a nivel nacional se encuentra alrededor de las 65362 toneladas. Por ello, es importante hacer una buena gestión de los residuos al final de su vida útil, con el fin de potenciar estrategias de valorización que reemplacen la producción de nuevos materiales y disminuyan las emisiones de CO₂.

Según la Directiva 2008/98/CE y la Ley Española de Residuos el orden de prioridades de la gestión de los residuos es: prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y eliminación (vertedero, incineración sin recuperación energética o con baja recuperación energética). Este trabajo se centra en el reciclaje de los residuos de yeso.

Reciclaje del yeso

A los residuos de yeso se le aplica la misma técnica de reciclaje que a la cerámica y al hormigón; es decir se somete también a un proceso de trituración. De este proceso se obtiene también material para relleno. Se han realizado ensayos de laboratorio en los que se estudian las propiedades del yeso reciclado, con el fin de poder ser empleado como enlucido de base en paredes y cielorrasos o como componente de nuevos cementos. Tal es el caso de Begliardo et al. (2007) quien sigue los siguientes pasos para el reciclaje de los residuos de yeso en construcción:

- Limpieza gruesa de contaminantes (madera, ladrillos y plástico)
- Secado en horno a 100°C para facilitar el tamizado
- Molienda y tamizado
- Nuevo secado a 110°C y 130°C

Así mismo, la empresa Knauf GmbH, con sucursal en España efectúa el reciclaje de placas de yeso laminado. El procedimiento seguido para el reciclaje del yeso consiste primero en la molienda y cribado con tromel de parrilla y criba circular móvil, posteriormente, se somete a un segundo proceso de cribado que permite eliminar el yeso aún retenido en las finas partículas de cartón (tromel secundario de cribado) (Fernández C. 2010).

El yeso proveniente de reciclaje es un yeso que anteriormente ha sido molido, calcinado y de nuevo molido. Esto provoca que se trate de un producto más molturado y como la conductividad térmica del yeso es muy baja, los granos de mayor tamaño se cuecen mucho más lentamente que los finos (Fernández C., 2010).

Por otra parte, en un estudio efectuado por Guillén Viña (2005), se destaca el reciclaje del yeso a partir de moldes usados. Los fragmentos de los moldes, una vez separados de elementos plásticos y metálicos, pueden ser triturados y clasificados hasta obtener un tamaño adecuado para ser añadido al clínker de cemento como regulador de fraguado o en la agricultura como corrector de PH, enmienda cálcica y aditiva para plantas de compostaje.

Aplicaciones del yeso reciclado

Chandara et al. (2009) estudia el reciclaje del yeso para reemplazar el yeso natural en la producción de cemento Portland. Se evalúan las propiedades mecánicas y químicas del cemento. Los esfuerzos de flexión y compresión fueron relativamente los mismos para ambos tipos de cemento. Los resultados demuestran que los residuos de yesos pueden ser usados como un material alternativo para el yeso natural en la producción de cemento portland.

Morales (2010) analiza la influencia que presenta la adición de diferentes proporciones de yeso reciclado frente al yeso natural en un sistema ternario. Se determinan las resistencias mecánicas y se tiene como resultado que las adiciones de los residuos de yeso en los sistemas de mezclas estudiados muestran un comportamiento similar al sistema de referencia con adición de yeso comercial.

Así mismo, Godinho-Castro et al. (2012) efectúa la incorporación de residuos de yeso en productos de bloque cerámico y evalúa la composición física y química de los bloques cerámicos y la eco toxicidad potencial de los mismos. Se demuestra la viabilidad del reemplazo de un 20% de arcilla por yeso reciclado en la fabricación de este tipo de bloque.

3. Metodología

3.1 Definición del objetivo y alcance

Se evalúa el proceso de producción del yeso, incluyendo las fases de extracción de materia prima mediante explosivos, restauración de la mina, trituración y cocción en el horno. Se evalúa también el proceso de reciclaje del yeso, el cual incluye la separación del yeso de los demás RCD, su trituración y cocción en el horno. En ambos procesos se incluyen las entradas de materia prima, las emisiones y la infraestructura bien sea de la mina o de la planta de reciclaje y/o maquinaria. No se tiene en cuenta el transporte. La unidad funcional es 1 kg de yeso.

3.2 Inventario del ciclo de vida

Los datos necesarios para llevar cabo el estudio de los impactos fueron recolectados de información primaria a través de la consulta a diferentes organismos y asociaciones como Ministerio de Industria, Energía y Turismo, consulta directa a empresas fabricantes de yeso y visitas a plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición. Los datos obtenidos de fuentes primarias fueron completados y/o confrontados con la base de datos Ecoinvent v2 y con fuentes secundarias.

Para la extracción y trituración del yeso natural, el consumo se extrajo de la información suministrada por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2011): electricidad (1,02 kWh/t)=0,00102 kWh/kg; diésel: 0,0211 MJ/kg (5,86 kWh/t); fuel oil: 0,00246 MJ/kg (0,68 kWh/t), gas natural: 0,045 MJ/kg (12,5 kWh/t). Para la cocción del yeso, el dato se extrajo de empresas consultadas y se hizo un promedio de los datos comprendidos entre los años (2009-2012): 282 kWh/t=1,015 MJ/kg.

En el caso del reciclaje se omite el proceso de obtención de la materia prima, pues ya se dispone del residuo. Tampoco se tiene en cuenta la restauración, necesaria en la explotación de yeso natural, pero sí el coste de trituración y el coste de secado.

En la obtención del yeso reciclado se evalúan dos escenarios. Un primer escenario en el que se considera que los residuos de yeso llegan separados y otro escenario donde los residuos de yeso llegan mezclados con el resto de RCD a las plantas de reciclaje de residuos.

Para el caso en que los residuos llegan separados, el coste de trituración es extraído del promedio de datos de una planta de reciclaje de Barcelona y de Rubio Díaz (2012) = 1,24 kWh/t= 0,0044 MJ/kg. El coste energético de cocción en el horno con gas natural fue extraído de Guillén Viñas (2005), quien destaca en su investigación que el secado de 1 tonelada de yeso con un 10% de humedad asciende a 130000 kcal, equivalentes a 151 kWh/t=0,5436 MJ/kg.

Cuando los residuos de yeso llegan mezclados a las plantas de tratamiento, junto con los demás RCD, es necesario efectuar primero un proceso de trituración y clasificación.

Para calcular el coste energético debido a la limpieza y separación de los RCD se emplearon los datos referidos al consumo energético por separación en plantas de reciclaje de RCD de Barcelona (2010-2013) y datos de Mercante Irma (2010) (Tabla 2).

Tabla 2 Consumo energético por separación de RCD en plantas de reciclaje.

Electricidad kWh/kg	Combustible (diésel en maquinarias) MJ/kg
0,00149	0,012

También se tuvo en cuenta el porcentaje de peso de cada residuo en el total de los RCD que entraron a las instalaciones en el año 2012 según la Agencia Catalana de Residuos (2012). De este modo se calculó el coste energético de separación del yeso (Tabla 3).

Tabla 3 Consumo energético por separación del yeso en plantas de reciclaje.

Residuo	Entrada a plantas de reciclaje %	Electricidad (kWh/kg)	Combustible (MJ/kg)
Yeso	0,02	0,0000003	0,0000024

Una vez el residuo de yeso es separado, el procedimiento seguido para su reciclaje es el mismo que cuando los residuos llegan limpios y clasificados. Al coste energético de la trituradora, 1,24 kWh/t= 0,0044 MJ/kg (promedio de datos suministrados por Planta de reciclaje de Barcelona (2010-2013) y Rubio Díaz (2012), se suma el consumo de combustible por clasificación =0,0000024 MJ/kg. El coste energético por cocción y la infraestructura debida a este proceso es similar al proceso de reciclaje en el caso en que los residuos lleguen separados (0,5436 MJ/kg) (Guillén Viñas 2005). Estos datos primarios se adicionaron a los procesos de la base de datos Ecoinvent v2.

3.3 Evaluación del impacto del ciclo de vida

Para los resultados de caracterización de los impactos se empleó el Software Sima Pro 7.3.3 y el método de evaluación de impactos Impact 2002+ por ser un compendio de varios métodos. Se evaluaron dos categorías: calentamiento global y energía no renovable.

Procesos empleados de la base de datos Ecoinvent v2 para la obtención del yeso natural:

- 1) Consumo de materias primas.
- 2) Extracción de materia prima mediante explosivos (65% yeso y 34% anhidrita, 1% otros). Se incluyen las emisiones debidas a este proceso.
- 3) Infraestructura (uso de la tierra de la parte construida), los sitios de producción y la parte pavimentada. Se incluyen los materiales usados y su disposición,

electricidad y diésel para construcción, mantenimiento y demolición. Se considera un tiempo de vida útil de 50 años.

- 4) Maquinaria para trituración y cinta transportadora.
- 5) Incluye restauración: transformación del sitio de extracción y el consumo de diésel de dicho proceso.
- 6) Proceso de cocción en el horno.
- 7) Consumo de combustibles.
- 8) Emisiones al aire.

Procesos empleados en Ecoinvent v2 para la obtención de yeso reciclado:

- 1) Infraestructura de la planta de reciclaje. Se considera un tiempo de vida útil de 50 años.
- 2) Maquinaria para trituración y cinta transportadora.
- 3) Proceso de cocción en el horno.
- 4) Consumo de combustibles.
- 5) Emisiones al aire.

4. Resultados y discusión

4.1 Resultados de caracterización del proceso de obtención del yeso natural

Los resultados de caracterización se obtuvieron mediante el uso del Software SimaPro 7.3.3.

En la Tabla 4, se muestran los resultados de caracterización para estas categorías de impacto.

Tabla 4 Resultados de la caracterización yeso natural.

Categoría de impacto	Unidad	Total
Calentamiento global	kg CO ₂ eq./kg	0,072525277
Energía no renovable	MJ primaria/kg	1,372033271

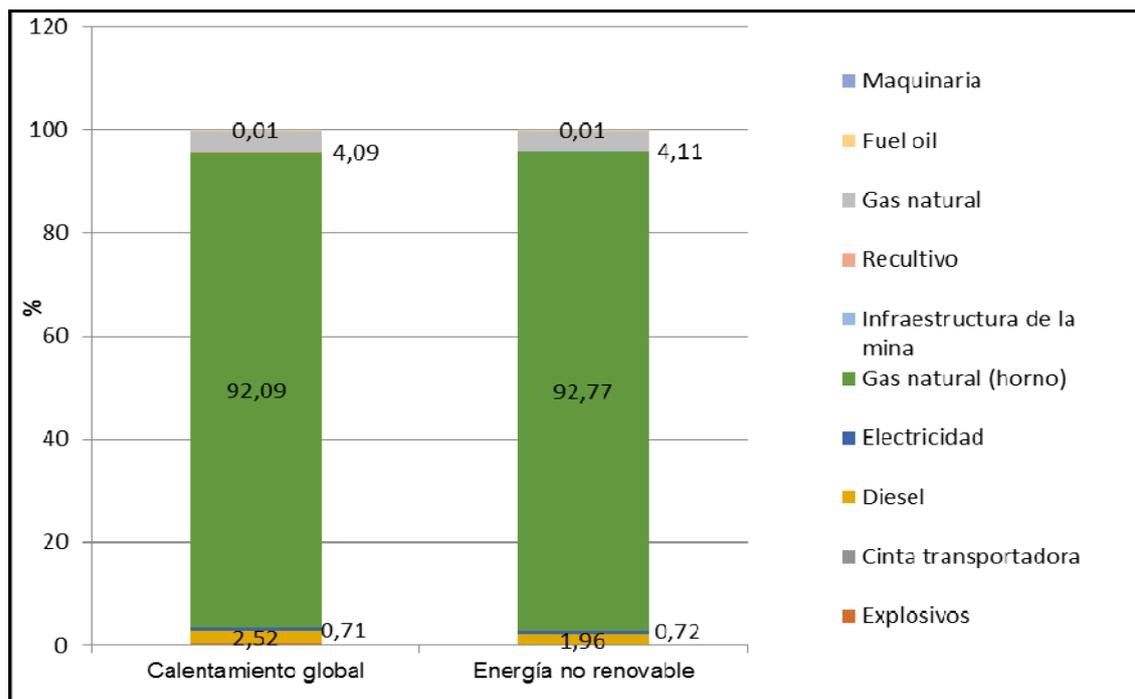


Figura 1 Resultados de caracterización del yeso natural (contribución de los procesos).

En la Figura 1, se muestra la contribución de cada uno de los procesos en las categorías de impacto evaluadas. Se observa que el proceso que produce mayores impactos en todas las categorías, es el proceso de cocción con gas natural. Siendo similares los impactos en ambas categorías (92%). Esto se explica principalmente, a que al emplear gas natural, además de consumir un recurso, se generan emisiones de gases de efecto invernadero (Güereca Hernández, 2007).

Otros procesos que contribuyen en mayor medida a los impactos en ambas categorías como se observa en la Figura 1, son los procesos de consumo de combustible (diésel y gas natural).

4.2 Resultados de caracterización de la producción secundaria del yeso

✓ Residuos separados

En la Tabla 5 se muestran los resultados de caracterización para las categorías de impacto evaluadas por el método Impact 2002+ para 1kg de yeso en el caso en que los residuos llegan separados a la planta de tratamiento.

Tabla 5 Resultados de caracterización para las categorías de impacto del reciclaje del yeso (residuos separados).

Categoría de impacto	Unidad	Total
Calentamiento global	kg CO ₂ eq./kg	0,036184
Energía no renovable	MJ primaria/kg	0,6879764

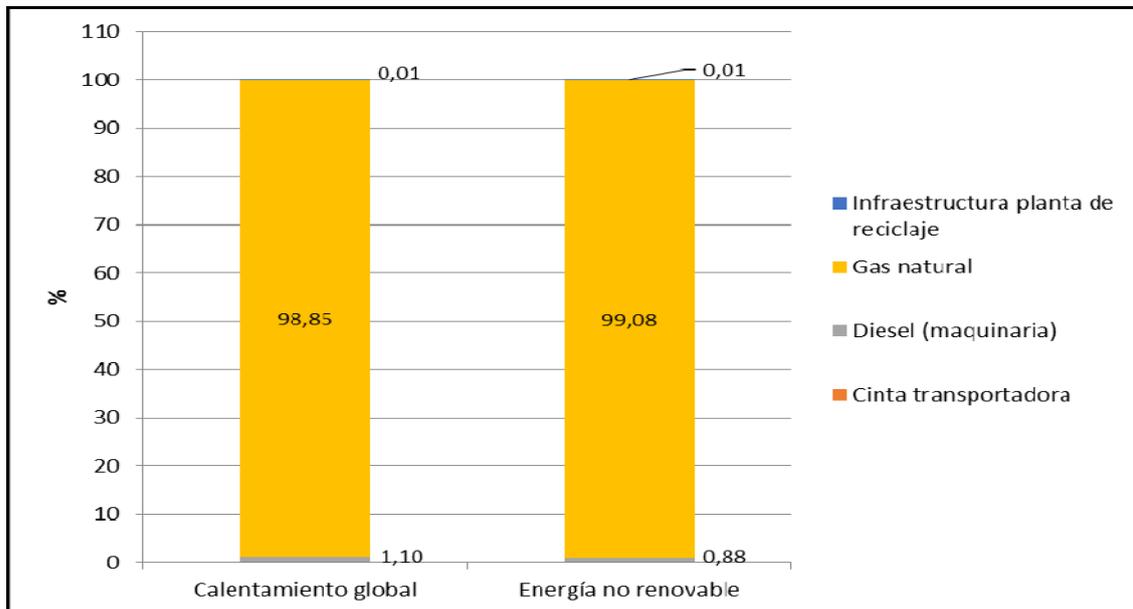


Figura 2 Resultados de caracterización para las categorías de impacto del reciclaje del yeso (residuos separados).

En la Figura 2, se observa que el proceso que contribuye en mayor medida a los impactos es, igual que en el yeso natural, el proceso de secado del residuo de yeso en el horno con gas natural (99,0 % en la categoría energía no renovable y 98,8 % en calentamiento global).

✓ **Residuos mezclados**

En la Tabla 6, se observan los resultados de caracterización para el reciclaje del yeso en el caso en que los residuos lleguen mezclados a la planta de tratamiento.

Tabla 6. Resultados de caracterización para las categorías de impacto del reciclaje del yeso (residuos mezclados).

Categoría de impacto	Unidad	Total
Calentamiento global	kg CO ₂ eq./kg	0,03618404
Energía no renovable	MJ primaria/kg	0,68797901

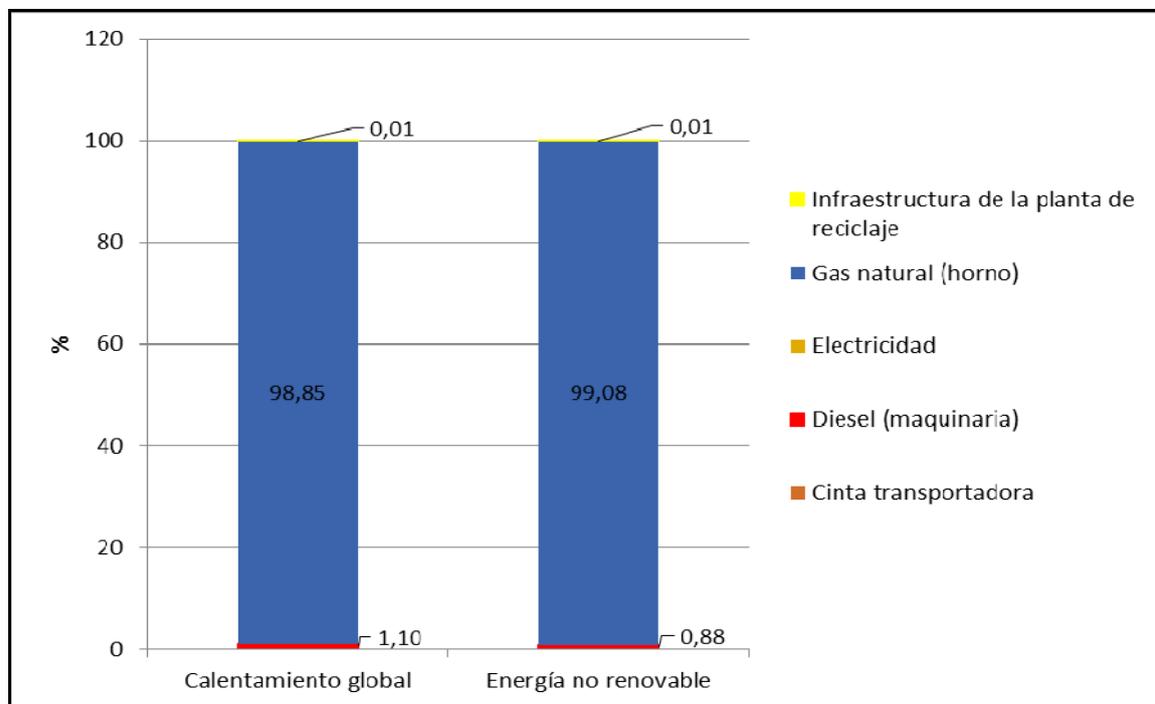


Figura 3 Resultados de caracterización para las categorías de impacto del reciclaje del yeso (residuos mezclados).

En la Figura 3 se muestra que el proceso que más contribuye a los impactos en ambas categorías, cuando los residuos llegan mezclados, es el consumo de gas natural en el horno.

En la Tabla 7 y Figura 4 se observa que las diferencias en el reciclaje de yeso a partir de residuos separados y a partir de residuos mezclados es despreciable, debido a que el coste energético causado por el proceso de clasificación y separación es mínimo y todas las infraestructuras y demás procesos permanecen iguales en los dos métodos de obtención del yeso.

Tabla 7 Comparación de resultados de caracterización del reciclaje del yeso (residuos separados-mezclados).

Categoría de impacto	Calentamiento global (kg CO ₂ eq./kg)	Energía no renovable (MJ primaria/kg)
Producción secundaria (mezclados)	0,036184041	0,687979006
Producción secundaria (separados)	0,036184003	0,687976438

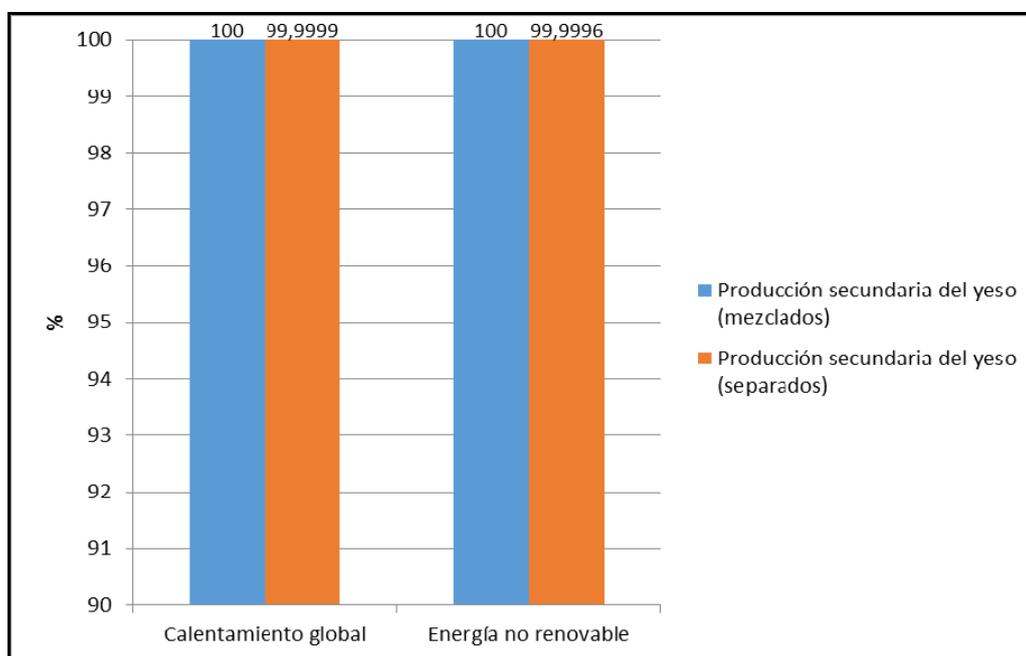


Figura 4 Comparación de resultados de caracterización del reciclaje del yeso (residuos separados-mezclados).

4.3 Comparación de los resultados caracterizados de producción primaria y producción secundaria

Como no existen grandes diferencias en los impactos del reciclaje del yeso obtenidos a partir de residuos separados y los impactos del reciclaje a partir de residuos mezclados, para llevar a cabo la comparación entre ambos procesos de producción, se escogió el caso en que los residuos se encuentran mezclados, ya que es el caso más habitual.

✓ **Yeso natural-yeso reciclado (residuos mezclados)**

Para efecto de comparar qué proceso de obtención de yeso, ya sea a partir de producción primaria (explotación en cantera) o producción secundaria (reciclaje de yeso), presenta menos impactos al medio ambiente, se llevó a cabo la comparación de los resultados de caracterización en la obtención de 1 kg de yeso por ambos procesos (Tabla 8 y Figura 5).

Tabla 8 Comparación de los resultados de caracterización de ambos procesos (residuos mezclados).

Categoría de impacto	Unidad	Producción secundaria	Producción primaria
Calentamiento global	kg CO ₂ eq/kg	0,036184003	0,072525277
Energía no renovable	MJ primaria/kg	0,687976438	1,372033271

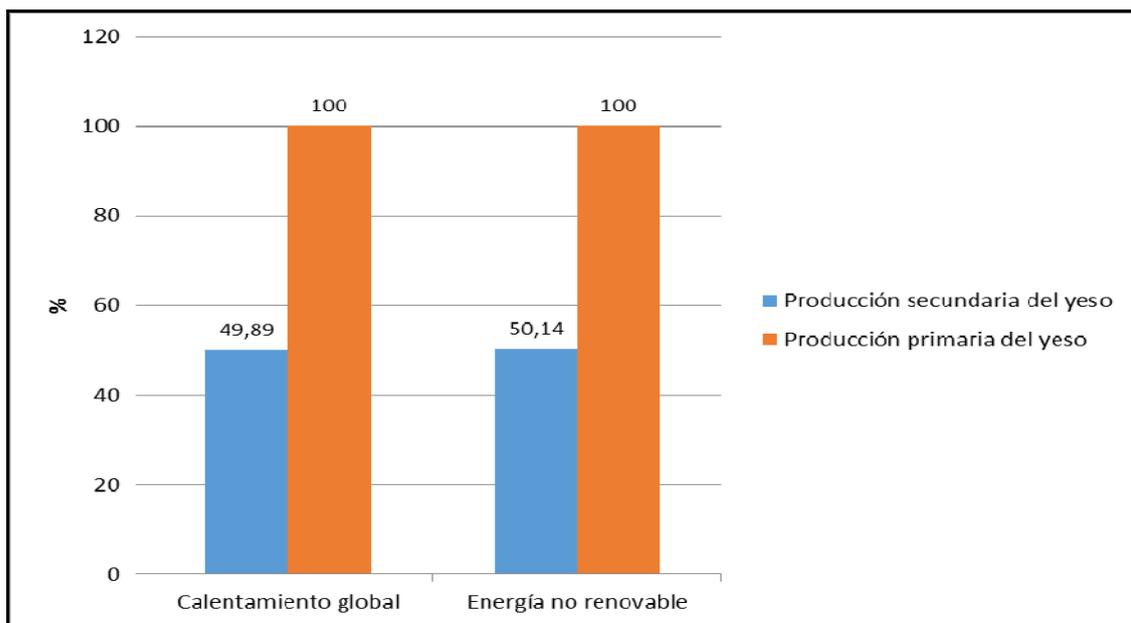


Figura 5 Comparación de los resultados de caracterización de ambos procesos (residuos mezclados).

Como se observa en la Figura 5, el reciclaje del yeso presenta menores impactos con respecto a la obtención del yeso natural en las categorías evaluadas. El reciclaje del yeso permite un ahorro del 49,8% en los impactos causados en la categoría calentamiento global y un ahorro del 50,1% en la categoría energía no renovable. Esto se atribuye al menor coste de energía por secado en el horno y por lo tanto a la reducción de emisiones que contribuyen al efecto invernadero (Güereca Hernández, 2007).

5. Conclusiones

- Los procesos que más contribuyen a los impactos en las categorías calentamiento global y energía no renovable en la producción primaria del yeso, son el proceso de cocción en el horno, el uso de gas natural y diésel.
- El proceso que produce mayores impactos, tanto en producción primaria como en producción secundaria, en las categorías calentamiento global y energía no renovable, es el proceso de cocción con gas natural en el horno.
- No existen diferencias considerables en el reciclaje del yeso a partir de residuos separados y a partir de residuos mezclados debido a que el coste energético causado por el proceso de clasificación y separación es mínimo.
- El reciclaje del yeso presenta menores impactos con respecto a la obtención de yeso natural en las categorías evaluadas. Presentando un ahorro del 49,8% de los impactos en la categorías calentamiento global y un ahorro de 50,1% en la categoría energía no renovable.
- Resulta viable a nivel ambiental la producción de yeso a partir de materia prima reciclada, tanto si los residuos de yeso llegan mezclados, como si llegan separados a la planta de tratamiento.
- Con el reciclaje del yeso se contribuye a reducir los impactos en el medio ambiente, debido a que se evita la extracción de materia prima original y con ello el uso de explosivos para su extracción y el proceso de restauración de la cantera. Además, al reciclar se evitan también los impactos ocasionados por la disposición de este residuo.

6. Bibliografía

AGENCIA CATALANA DE RESIDUOS (2012)

Begliardo, H, Panigatti, M, Sánchez, M, Griffa, C, Boglione, R, Casenave, S and Cassina, D, 2007. *Estudio del reciclaje de residuos de construcción con yeso. Congreso SAM/CONAMENT. San Nicolás, Argentina del 4 al 7 de septiembre de 2007.*

Bellart Crevillen, Meritxell, 2009. *Impacto ambiental y ciclo de vida de los materiales de construcción*. S.I. : Tesis de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, pág, 85.

Bustillo Revuelta, Manuel and Calvo Sorando, José Pedro, 2005. *Materiales de construcción*. Madrid : Fuego. ISBN 8492312882.

Chandara, Chea, Azizli, Khairun Azizi Mohd, Ahmad, Zainal Arifin and Sakai, Etsuo, 2009. Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. In : *Waste Management*. Vol. 29, n° 5, p. 1675–1679.

Dombrowski, U and Ernst, S, 2014. Effects of Climate Change on Factory Life Cycle. In : *Procedia {CIRP} 2014*. Vol. 15, n° 0, p. 337–342.

Ecoinvent, (2007). Ecoinvent Data v2. Ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventory.

Fernandez Casado, Sergio (2010). Reciclaje interno de los residuos en las fábricas. Reutilización del yeso reciclado para la fabricación de placas de yeso laminado. Comunicación técnica. CONAMA 10 CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. España. pág. 17.

Gieseckam, Jannik, Barrett, John, Taylor, Peter and Owen, Anne, 2014. The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in {UK} construction. In : *Energy and Buildings*. Vol. 78, n° 0, p. 202–214.

Godinho-Castro, Alcione P, Testolin, Renan C, Janke, Leandro, Corrêa, Albertina X R and Radetski, Claudemir M, 2012. Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process. In : *Waste Management*. Vol. 32, n° 1, p. 153–157.

González Armada, Carlos, 2010. *Cambio climático: causas, consecuencias y soluciones*. Madrid : Amv. ISBN 9788496709485; 9788484764021, pp.10-45.

Gremi d' Arids de Catalunya. 2011. Guía de millora en la gestió energètica a les pedreres i graveres de Catalunya.

Güereca Hernández, Leonor Patricia, 2007. *Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis del ciclo de vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales*. S.I. : Universitat Politècnica de Catalunya.

GUILLÉN VIÑAS, José Luis (2005) *Nuevas aplicaciones de recursos yesíferos: desarrollo, caracterización y reciclado*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Minas (UPM).Pág. 482.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (2013). Notas de prensa, 7 de octubre de 2013. Disponible en: www.ine.es/prensa/prensa.htm.

IPCC 2013. CLIMATE CHANGE 2013. The physical science Basis. Intergovernmental panel on climate change. Working group I.

MERCANTE, Irma; BOVEA EDO, María; IBÁÑEZ FORÉS, Valeria. ARENA, Alejandro P. 2010. Perfil ambiental de la gestión de los residuos de construcción y demolición. Elaboración de los inventarios de ciclo de vida. 3ª Simposio Iberoamericano de Ingeniería de residuos. 8-10 septiembre. Brasil.

MONAHAN, J and POWELL, J C, 2011. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. In : *Energy and Buildings*. Vol. 43, n° 1, p. 179–188.

MORALES MARTÍNEZ, Laura. 2010. Reutilización de residuos de edificación para el desarrollo de materiales cementantes con características especiales. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis de máster.

MORÁN DEL POZO J, Juan Valdés A, Aguado P, Guerra M, Medina C. 2011. Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: limitaciones. Informes de la Construcción; Vol. 63:p. 89–95.

Organización Internacional de Normalización (ISO): Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco. ISO 14040:2006.

REY MARTÍNEZ, Francisco Javier and VELASCO GÓMEZ, Eloy, 2006. *Eficiencia energética en edificios: certificación y auditorías energéticas*. Madrid: Thompson. ISBN 8497324196, pp. 1-6,64-67.

RUBIO DÍAZ, Ángel. Optimización del proceso de producción en planta de tratamiento de áridos. 2012. Trabajo final de carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Departamento de ingeniería de materiales.

SOLÍS-GUZMÁN, Jaime, MARRERO, Madelyn, MONTES-DELGADO, Maria Victoria and RAMÍREZ-DE-ARELLANO, Antonio, 2009. A Spanish model for quantification and management of construction waste. In : *Waste Management*. Vol. 29, n° 9, p. 2542–2548.

WU, Peng, XIA, Bo, PIENAAR, Josua and ZHAO, Xianbo, 2014. The past, present and future of carbon labelling for construction materials – A review. In : *Building and Environment*. Vol. 77, n° 0, p. 160–168.

YUAN, H P, SHEN, L Y, HAO, Jane J L and LU, W S, 2011. A model for cost–benefit analysis of construction and demolition waste management throughout the waste chain. In : *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 55, n° 6, p. 604–612.

ZABALZA BRIBIÁN, Ignacio, VALERO CAPILLA, Antonio and ARANDA USÓN, Alfonso, 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. In : *Building and Environment*. Vol. 46, n° 5, p. 1133–1140.