

CAPÍTULO VII

EFECTOS ENERGÉTICOS/ AMBIENTALES DE LA PRESENCIA DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO EN EL MATERIAL CERÁMICO DE MEJOR COMPORTAMIENTO

25. La huella de carbono en el ámbito de la economía circular

Existe una total relación entre la aplicación de los principios de la economía circular en la industria cerámica y la huella de carbono (e, implícitamente la energía embebida) de los productos. No en vano, la reducción del uso de los recursos y la generación de residuos lleva asociada una reducción del consumo de energía y de la huella de carbono de los productos.

Esta afirmación se fundamenta en el principio básico de la economía circular, que es cerrar el ciclo de vida de los productos, servicios, residuos, materiales, agua y energía. Así, el residuo se convierte en recurso que vuelve a la naturaleza sin causar daños medioambientales al no agotar su vida útil, reduciendo la utilización de materias primas vírgenes (enfoque *Cradle to cradle*).

No cabe duda de que, al devolver al residuo la calidad de materia prima, se está reduciendo el impacto ambiental asociado tanto al proceso de extracción de materias primas de la naturaleza como al tratamiento que se da a los residuos al final de su vida útil, lo que se traduce a su vez en una disminución de la huella de carbono.

Por otra parte, al relacionar productos de construcción, economía circular y reducción de impactos ambientales, es necesario tener en consideración que el

impacto ambiental de un edificio comienza desde el mismo momento en que se extraen las materias primas para la fabricación de los productos de construcción. Por lo tanto, las ventajas medioambientales de un material de construcción redundarán en un mejor comportamiento medioambiental del edificio y, por extensión, una inestimable contribución al desarrollo sostenible del planeta por parte del sector de la construcción, responsable del 50% de las emisiones de CO₂ y que consume el 60% de los recursos no reutilizables del planeta.

Se debe afirmar, por tanto, que el uso de nutrientes tecnológicos como materia prima en la fabricación de productos cerámicos, como mecanismo para la reducción del impacto ambiental asociado a estos, repercute positivamente en la contribución al desarrollo sostenible del sector de la construcción.

En lo referente a los impactos medioambientales propiamente dichos, la lucha contra el cambio climático es un elemento clave por considerar en el desarrollo de productos de construcción, puesto que el cambio climático representa una de las mayores amenazas ambientales, sociales y económicas del planeta. Como consecuencia del cambio climático, la temperatura media de la tierra ha aumentado 0,76 °C desde 1850 y, de mantenerse las tendencias actuales de emisiones, es posible que en el año 2050 la temperatura media de la tierra suponga, según el informe Stern, además de los importantes impactos sociales y medioambientales, enormes esfuerzos económicos en mitigación y adaptación a la nueva situación.

Las acciones que se están llevando a cabo a nivel internacional en la lucha contra el cambio climático son muy conocidas. Entre todas ellas se destaca en particular la firma del Protocolo de Kioto, compromiso internacional para reducción de emisiones de CO₂, refrendado en posteriores convenciones de Naciones Unidas en Doha y París.

Sin embargo, para poder determinar el beneficio, desde el punto de vista medioambiental, que supone el uso de nutrientes tecnológicos en la fabricación de productos cerámicos, es necesario disponer de información objetiva del costo ambiental y del consumo energético de ese producto, puesto que lo que no se mide no se controla ni se reduce.

Así, es necesario conocer, con carácter previo, las magnitudes de los impactos ambientales de un producto cerámico convencional, que serán la base para la evaluación y validación de la mejora que supone, desde el punto de vista medioambiental, el uso de nutrientes tecnológicos en la industria cerámica. Las herramientas de mayor relevancia para conocer, cuantificar y actuar sobre estos impactos son la “huella de carbono” y la cuantificación de la “energía embebida” de los productos.

Estas herramientas son de especial utilidad en el sector de los productos cerámicos con miras a que la reducción de la emisión de GEI sea un elemento clave

a nivel internacional en las políticas de desarrollo sostenible. Dicho sector es, después de todo, de uso intensivo de energía y generador de altas cantidades de emisiones de CO₂.

Por tanto, los conceptos de la economía circular y la medida de la huella de carbono y energía embebida se encuentran muy relacionados, como elementos de evaluación y medida de la reducción del impacto ambiental que supone el uso de residuos como materias primas en la fabricación de productos cerámicos.

26. La huella de carbono

La huella de carbono (HdC) se define, según el informe ISO/TS 14067:2013, como el “Sumatorio de emisiones de gases de efecto invernadero (y retirada) en un sistema de producto, expresado como CO₂ equivalente y basado en una evaluación del ciclo de vida”.

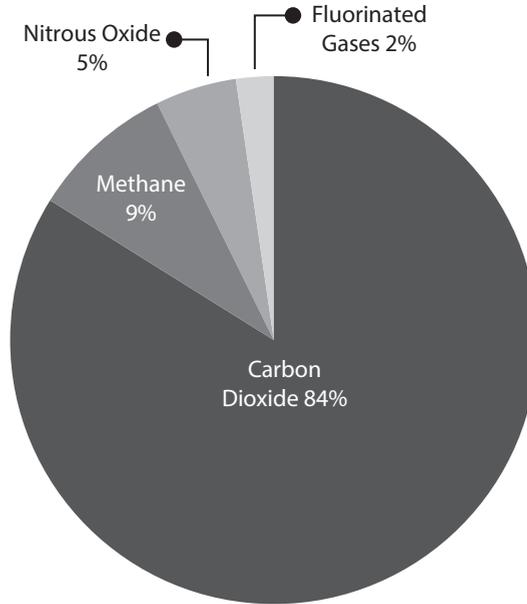
Se puede decir que la HdC es una versión simplificada de un análisis de ciclo de vida en el que se analiza la categoría de impacto asociada al calentamiento global. La HdC está considerada en la actualidad como una herramienta válida, internacionalmente aceptada, de evaluación ambiental de productos y servicios. Surge como una medida de la cuantificación del efecto de los GEI en el medioambiente, ya que permite que las emisiones de estos puedan cuantificarse, comprobarse y gestionarse, lo que hace posible comparar la HdC entre diferentes productos, actividades o servicios. La HdC tiene en cuenta todos los GEI que contribuyen al calentamiento global, para después convertir los resultados individuales de cada gas a equivalentes de CO₂. Por ello, el término correcto es HdC equivalente o emisiones de CO₂ equivalentes (CO_{2equiv}).

Se denominan GEI a los gases cuya presencia en la atmósfera contribuye al efecto invernadero. Los más importantes están presentes en la atmósfera de manera natural, pero también entran en este concepto algunos gases artificiales, producto de la industria. Esos gases contribuyen más o menos de forma neta al efecto invernadero. Los GEI, entonces, tal como están recogidos en el Anexo A del Protocolo de Kioto, son:

- Dióxido de carbono (CO₂).
- Metano (CH₄).
- Óxido de nitrógeno (N₂O).
- Hidrofluorocarburos (HFC).
- Perfluorocarburos (PFC).
- Hexafluoruro de azufre (SF₆).

El dióxido de carbono (CO_2) es el elemento que más contribuye al efecto invernadero acentuado (artificial), siendo responsable de más del 80% del efecto invernadero.

Figura 60. Reparto de las emisiones de GEI en países industrializados (Gelves *et al.*, 2013)



De igual forma, no todos los GEI tienen el mismo potencial de calentamiento global, dando como valor de referencia 1 al CO_2 (ver tabla 39).

Tabla 39. Potencial de calentamiento global de los GEI

Gas	Fórmula	Potencial de calentamiento IPCC 1995
Dióxido de carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	21
Óxido nitroso	N_2O	310
Hidrofluorocarburos		
HFC-23	CHF_3	11.700
HFC-32	CH_2F_2	650
HFC-41	CH_3F	150
HFC-43-10mee	$\text{C}_5\text{H}_2\text{F}_{10}$	1.300
HFC-125	C_2HF_5	2.800
HFC-134	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4(\text{CHF}_2\text{CHF}_2)$	1.000
HFC-134a	$\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4(\text{CH}_2\text{FCF}_3)$	1.300

Gas	Fórmula	Potencial de calentamiento IPCC 1995
HFC-152a	$C_2H_4F_2(CH_3CHF_2)$	140
HFC-143	$C_2H_3F_3(CHF_2CH_2F)$	300
HFC-143a	$C_2H_3F_3(CF_3CH_3)$	3.800
HFC-227ea	C_3HF_7	2.900
HFC-236fa	$C_3H_2F_6$	6.300
HFC-245ca	$C_3H_3F_5$	560
Perfluorocarburos		
Perfluorometano	CF_4	6.500
Perfluoroetano	C_2F_6	9.200
Perfluoropropano	C_3F_8	7.000
Perfluorobutano	C_4F_{10}	7.000
Perfluorociclobutano	$c-C_4F_{10}$	7.000
Perfluorociclobutano	$c-C_4F_8$	8.700
Perfluoropentano	C_5F_{12}	7.500
Perfluorohexano	C_6F_{14}	7.400
Hexafluoruro de azufre	SF_6	23.900

La normativa de aplicación para el cálculo de la HdC y cuantificación de los GEI se corresponde con la familia de normas ISO (International Standard Organization), comprendidas entre la ISO 14064 y la 14069, que tienen como objetivo dar credibilidad y aseguramiento a los estudios de emisión de GEI y a las declaraciones de reducción o eliminación de GEI. La norma de referencia, a nivel internacional, de cálculo de HdC es ISO 14.067 (Mora, 2015): *Huella de carbono de productos-requerimientos y directrices para cuantificación y comunicación*. Esta norma toma como base la metodología de ciclo de vida de las normas ISO 14040 y 14044 (Lombana, 2011) y especifica criterios y requisitos específicos para los estudios de cuantificación de HdC.

26.1 Métodos de cálculo

No se cuenta con un marco metodológico común y uniforme sobre el cálculo de la HdC. Para cuantificar la HdC, debe aplicarse un determinado protocolo de estimación y contabilidad de emisiones de GEI. Dentro de las metodologías de cálculo existentes, la más adecuada para el caso de los productos de construcción es el PAS 2050 (Especificaciones Públicamente Disponibles). Este método, elaborado por el Instituto Británico de Estandarización, se presenta como una guía metodológica que describe paso a paso los criterios para determinar y tomar

en cuenta, está enfocado al cálculo de las emisiones de productos y servicios, y responde a las normativas ISO y a las del Protocolo GEI.

La metodología define inicialmente las fuentes de emisiones consideradas, además de cinco grandes bloques de actividades, cuyas emisiones deben ser contempladas en la estimación del ciclo de vida de bienes y servicios. Con la enumeración de las fuentes de emisiones consideradas, se realiza una acotación general del ámbito al que se aplica el indicador. La HdC es calculada adicionando los varios factores que inciden en la producción de GEI. Un modelo simple es la suma ponderada de los diversos factores, como se describe en la siguiente ecuación:

$$HC = \sum x_i * y_i * F_i$$

En esta ecuación general, x_i e y_i son factores de conversión y equivalencia que dependerán del tipo aplicación y magnitud y de la influencia de la variable F_i (uso de carbón o gas natural, emisiones directas o indirectas, kilómetros recorridos, etc.).

26.1.1 Energía embebida

La energía embebida (E_e), en el caso concreto de los productos cerámicos, es un concepto íntimamente ligado a la huella de carbono puesto que en la medida de la energía embebida de un producto están implícitos los impactos asociados a los GEI.

La E_e se define como la suma de toda la energía necesaria para producir bienes o servicios, considerados como si esa energía se incorporara en el propio producto (Smykatz-Kloss, 1974). En términos específicos de productos cerámicos, la energía embebida se asocia al consumo energético derivado de la adquisición de las materias primas, la necesaria para su elaboración/fabricación, y su transporte hasta el lugar de construcción del edificio.

A diferencia de la HdC, no existe una normativa internacionalmente aceptada para el cálculo de la E_e de productos. Convencionalmente, para productos de construcción, la energía incorporada se mide como una cantidad de energía no renovable por unidad de material, expresada como megajulios (MJ) o gigajulios (GJ) por unidad de peso (kilogramo o tonelada). La cantidad total de energía es lo que se denomina energía embebida o incorporada. De la misma forma, los diferentes métodos de cálculo actuales pueden producir resultados muy diferentes. La fórmula de cálculo de la E_e sería la siguiente:

$$E_e = \sum m_i * M_i$$

Donde:

E_e : Energía embebida.

m_i : Cantidad de material.

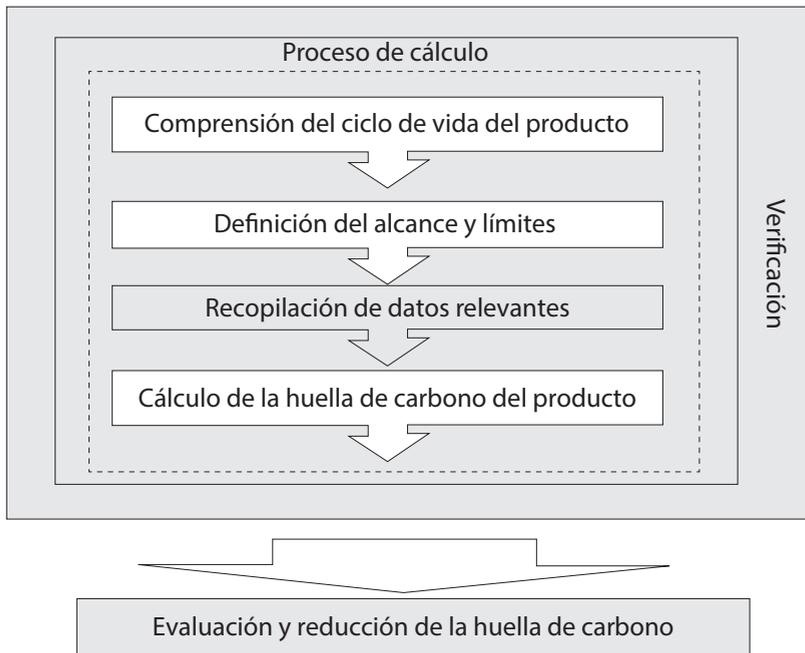
M_i : Contenido energético por unidad de material.

Como se ha comentado, en el caso concreto de productos cerámicos, la importante relación que existe entre ellos y el consumo energético (son fabricados con uso intensivo de energía) hace que el estudio de su Ee haya adquirido una gran importancia como información relevante de impacto ambiental. Hay que tener en cuenta que la Ee de un producto debe estar referida a la *energía primaria*, definida esta como la cantidad total de recursos energéticos consumidos, ya sea directamente o para su transformación en otra forma de energía. El indicador de energía primaria se expresa habitualmente en kilotoneladas equivalentes de petróleo (ktep), aunque también puede expresarse en MWh (o kWh).

26.1.2 Metodología de cálculo de HdC y Ee de la aplicación de los nutrientes tecnológicos

El cálculo de la HdC (y Ee) en la presente tesis se realiza siguiendo la metodología descrita en PAS 2050 y el informe ISO/TS 14067:2013. De manera sencilla, la metodología tipo que se debe seguir es la que se muestra en la figura 61.

Figura 61. Pasos para el cálculo de la HdC (PAS 2050:2011)



1. **Compresión del ciclo de vida del producto cerámico. Construcción del mapa de procesos del producto objeto de la tesis:** Partiendo de una identificación de todos los materiales, actividades y procesos que contribuyen en el ciclo de vida del producto, se genera el mapa de procesos. Este representa el ciclo de vida de la unidad funcional o declarada definida para el producto por estudiar. Se tiene en cuenta tanto el proceso convencional de producción de los productos cerámicos como las etapas y/o procesos que son modificados/eliminados con la introducción de los nutrientes tecnológicos.
2. **Definición de alcance y límites del sistema:** Una vez definido el mapa de procesos, se limita el alcance del análisis con base en los objetivos de la presente tesis, concretando las fases que componen los procesos que van a ser objeto de estudio. La metodología basada en PAS 2050 establece unos criterios que permiten definir claramente este alcance del análisis. Se define la unidad funcional del producto cerámico.
3. **Recopilación de datos relevantes:** Una vez definidos el mapa de procesos y las fases de estos, se realiza la recopilación de la información que permita estimar las emisiones de GEI por unidad funcional de producto cerámico, tanto de datos de primer orden (planta de producción de cerámica y de producción de las empresas donde se generan los residuos utilizados como nutrientes tecnológicos) como de bases de datos, contrastadas a nivel nacional e internacional.
4. **Cálculo. Aplicación de metodología:** Una vez obtenidos los datos de las distintas materias, actividades y procesos relacionados con el ciclo de vida del producto cerámico, se realizan los balances de masas de cada fase del proceso y se aplican los correspondientes factores de emisión. El conjunto de emisiones generadas a lo largo de las etapas que se incluyen dentro del mapa de procesos da lugar a las emisiones de $\text{CO}_{2\text{equiv}}$ por unidad funcional o declarada de producto.
5. **Análisis de incertidumbre:** En función de la procedencia de la información utilizada en el cálculo, la precisión de los resultados obtenidos será mayor o menor. Para reducir la incertidumbre del proceso, se deberá utilizar, siempre que sea posible, información de primer orden. En el caso de que sean datos secundarios, se procurará que las fuentes se encuentren actualizadas y sean fiables. Al finalizar la evaluación se analizará la posibilidad de actualizar algunos datos para llegar a resultados más precisos.

En la presente tesis, el cálculo de la reducción de HdC y Ee se realiza tanto para la etapa de fabricación de producto como para la etapa de uso del edificio donde es colocado el producto cerámico, en el que se sustituye parte de las materias primas por nutrientes tecnológicos.

El análisis y evaluación se realiza, en primer lugar, a partir de los datos obtenidos en la fase de inventario del sistema de producción convencional. Posteriormente,

se realiza el cálculo considerando la entrada de los nutrientes tecnológicos objeto de la presente investigación en el proceso de producción cerámico, con base en la dosificación óptima considerada como resultado del estudio tecnológico de probetas.

En la etapa de cocción de producto, se realiza análisis de las diferencias que se obtienen en un proceso de cocción con horno colmena respecto de un proceso de cocción con horno túnel.

Los resultados de HdC y Ee del proceso de producción convencional son comparados con los que se obtienen respecto del proceso de producción utilizando nutrientes tecnológicos. De este modo es posible evaluar, desde el punto de vista medioambiental, la repercusión que tiene el uso de nutrientes tecnológicos en el proceso de fabricación de productos cerámicos.

En la etapa de la vida útil de la edificación, el cálculo de HdC y Ee se realiza a partir de los valores de los coeficientes de conductividad que se obtienen. Así se puede cuantificar el teórico ahorro energético en la vida útil del edificio que supondría el uso del nuevo producto cerámico con nutrientes tecnológicos respecto del uso de un producto cerámico convencional, así como respecto del uso de productos de construcción sustitutivos de los productos cerámicos.

De esta forma se obtienen magnitudes de cuantificación y evaluación del impacto ambiental, que sirven para determinar, de manera clara y objetiva, la contribución de los nuevos productos desarrollados a la implantación del concepto de economía circular en el proceso de producción de la industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta.

27. Metodología para el cálculo de la huella de carbono

Se realiza un análisis comparativo de la huella de carbono del producto convencional respecto del producto innovador, que presenta un 10% en masa de ceniza volante como materia prima, en sustitución parcial de la arcilla.

El cálculo de la huella de carbono se realiza siguiendo la metodología descrita en PAS 2050 y en la norma ISO 14067. Una vez definido el mapa de procesos (etapa 1), se seleccionan los parámetros de estudio más relevantes dentro de la información medioambiental de un producto.

Se determinan el alcance y los límites del sistema, fijando así mismo los parámetros por estudiar (etapa 2), y se procede a obtener toda la información necesaria para lograr la mayor cantidad de datos posibles que conduzcan a alcanzar los objetivos planteados (etapa 3). Enseguida, se define un protocolo estándar de recogida de datos para el inventario de emisiones de GEI expresados en el Anexo A del

protocolo de Kioto (CO₂, N₂O, CH₄, CFC, PFC, HF₆) (Segerson & Miceli, 1998) y energía, así como un método de evaluación y valoración de los datos recogidos, teniendo en cuenta las directrices que marcan las series de norma ISO que le son de aplicación.

Para el estudio comparativo se toma como caso representativo la producción de una empresa del sector cerámico del área metropolitana de Cúcuta. Se considera el proceso de producción de manera comparativa con el resultado que se obtendría de sustituir, durante el mismo proceso productivo, el 10% de materia prima por nutriente tecnológico (ceniza volante).

La recogida de datos/información se realiza por dos vías distintas:

- Información de primer orden: Recogida de información de fábrica de producción y de canteras. En este caso de estudio se tomará una ladrillera del sector cerámico y, como suministradora de materia prima, una mina de El Zulia y la central termoeléctrica (ceniza volante).
- Información de segundo orden: Recopilación bibliográfica de estudios llevados a cabo en la materia objeto de bases de datos contrastadas, así como de factores de conversión para cálculo de las emisiones.

Luego se hace la evaluación de los datos y se calcula la huella de carbono y la energía embebida (etapa 4), mediante homogeneización y depuración, con base en factores de emisión y conversión internacionalmente aceptados, tomados en la recopilación de datos de segundo orden.

Para la construcción del mapa de procesos, se incluyen todos los apartados correspondientes a la primera etapa del proceso de cálculo de la huella de carbono, referentes a la compresión del producto y su ciclo de vida.

El mapa de procesos representa el ciclo de vida de la unidad funcional o declarada definida para el producto que se va a estudiar, lo que permitirá situar las fuentes de emisión en un diagrama que refleje las etapas que conforman el alcance del cálculo. Esto ayuda, entre otras cosas, a identificar qué actividades podrían ser críticas a la hora de abordar planes de reducción de impactos ambientales.

Los mapas de proceso sintetizan las diferentes adecuaciones y transformaciones que sufren las materias primas hasta convertirse en el producto final, en este caso el producto cerámico, de un modo gráfico.

Los procesos del ciclo de vida, con carácter genérico, del producto cerámico objeto de la tesis se pueden resumir en los siguientes:

- Extracción de materias primas (minas).
- Transporte de materias primas a planta.

- Molienda.
- Moldeo.
- Secado.
- Cocción.
- Clasificación y empaque.
- Transporte a destino final.
- Puesta en obra.
- Mantenimiento de la edificación.
- Demolición de la edificación (fin de la vida útil) y tratamiento del residuo al final.

28. Reglas de Categoría de Producto

De acuerdo con los requerimientos de la normativa por aplicar en el presente estudio, al realizar el cálculo de la huella de carbono es necesario seguir unas determinadas reglas, requisitos y pautas específicas, recopiladas en las Reglas de Categoría de Producto (RCP).

Del análisis a nivel internacional en este particular, se comprueba la disparidad que existe entre RCP de distintos programas en cuanto al alcance, los límites del sistema y los impactos, así como las diferencias específicas en los elementos técnicos. Esto refleja principalmente los diferentes propósitos de la RCP (por ejemplo, etiqueta/informe), las diferentes normas en las que se basan (por ejemplo, ISO 14025/PAS 2050), el uso de distintos sistemas de clasificación de productos, o simplemente el resultado de ser desarrolladas de forma independiente.

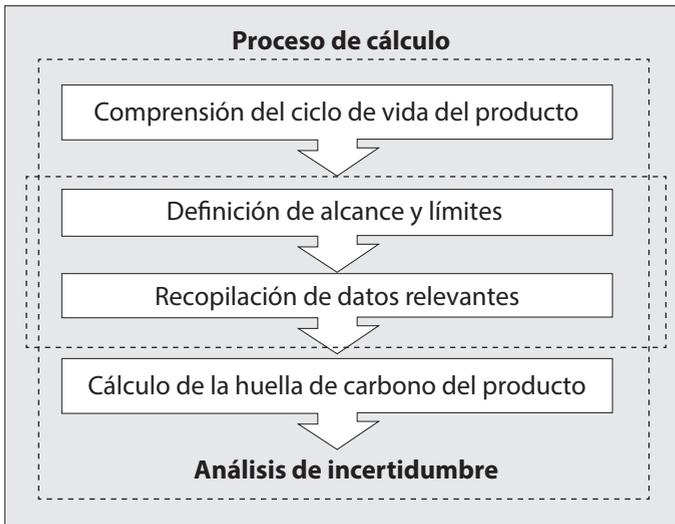
La Asociación Europea de Fabricantes de Productos Cerámicos TBE ha publicado recientemente el documento *TBE PCR for Clay Construction Products: Guidance Document for Developing an EPD* (Tiles & Bricks Europe, 2014). Este documento describe los parámetros y la metodología que se debe seguir en el desarrollo de DAP (Declaraciones Ambientales de Producto) para productos cerámicos a nivel europeo.

Al no existir RCP específica para los productos de cerámica estructural en Colombia (más allá de las indicaciones que marca el sello ambiental Colombiano, NTC 6033), se siguen en el presente análisis comparativo las reglas marcadas en la Norma 15084, teniendo también como referencia las RCP desarrollada por TBE y con el apoyo de las RCP desarrolladas a nivel internacional para productos cerámicos.

28.1 Establecimiento de límites y alcance

Se corresponde con la segunda etapa del cálculo de la huella de carbono y contiene los procesos de selección de productos, definición de la unidad funcional y establecimiento de los límites del sistema.

Figura 17. Etapa de definición de alcance y límites en el proceso de cálculo (PAS 2050:2011)



28.2 Definición de la unidad funcional/unidad declarada

La unidad funcional o la unidad declarada ofrecen una referencia para que los datos ambientales puedan normalizarse y deben estar relacionadas con las funciones típicas de los productos.

La unidad funcional cuantifica las funciones o las características de prestación de un sistema del producto cuando se considera el ciclo de vida completo de este. En este orden de ideas, la unidad funcional de un producto de construcción debe basarse en el uso funcional o las características prestacionales cuantificadas relevantes de este cuando es integrado en un edificio, así como en la vida de servicio de referencia del producto bajo condiciones estándares definidas. Aunque siempre es recomendable que la unidad funcional esté relacionada con la utilidad del producto, se ha comprobado que estudios similares utilizan la masa como unidad declarada. Así, se tiene el kilogramo o tonelada de producto cerámico acabado en lugar de utilizar el metro cuadrado de unidad constructiva de la que forma parte o unidad de pieza.

Por su parte, la unidad declarada es la cantidad de un producto que se utiliza para expresar la información ambiental contenida en los módulos de información. Se

aplica en vez de la unidad funcional cuando el estudio solo se basa en uno o más módulos de información en lugar del ciclo de vida completo.

La unidad declarada proporciona una referencia por medio de la cual el módulo de información del flujo de materiales normaliza al producto de construcción (en un sentido matemático). Esta unidad se relacionará con las funciones típicas de productos. Cuando es un estudio “cuna a puerta” no se consideran todas las etapas del ciclo de vida de los productos por lo que los datos hacen referencia a la unidad declarada y no de la unidad funcional.

Las razones son varias. Por una parte, se ha podido constatar que las industrias cerámicas, por regla general, registran datos referentes a producción por unidad de masa de producto fabricado. Por otra parte, se sabe que en una misma unidad funcional, por ejemplo metro cuadrado de fachada, el número de piezas que entran a formar parte puede variar considerablemente dependiendo de diseño de la fachada (ancho de llaga y tendeles, espesor de la fábrica, etc.) y del tipo de pieza que se utilice (dimensiones). Ahora bien, conociendo el impacto por unidad de masa de producto se podrá conocer el impacto asociado a la unidad constructiva, puesto que solo habrá que multiplicar el impacto asociado a cada tonelada de producto, el peso de cada pieza y el número de piezas que componen la unidad constructiva. Además, el hecho de no considerar todas las etapas del ciclo de vida hace que la unidad por revisar sea la unidad declarada y no la unidad funcional.

Con base en estas indicaciones, y considerando que la cuantificación de la huella de carbono debe ser indicada en masa de CO₂ por unidad funcional o declarada, la unidad declarada estará *en función de cada uno de los productos seleccionados y será “tonelada de producto cerámico fabricado”*.

En función de la masa de cada uno de los productos, se puede establecer también como *unidad alternativa la unidad de producto*, únicamente a título informativo o de referencia, puesto que no se especificará la función concreta del producto. Atendiendo a los criterios establecidos en la RCP publicada por TBE para DAP de productos cerámicos, la unidad funcional se define como: *1 tonelada de producto cerámico con una vida útil de servicio esperada de 150 años*.

28.3 Límites del sistema

Los límites del sistema indican los procesos que deben ser incluidos en el estudio. Estos deben ser coherentes con el objetivo del estudio y separar aquellos procesos y etapas del sistema que no corresponden a dicho objeto de análisis.

El presente estudio, considerando que solo se analizan los datos desde la extracción de las materias primas hasta la puesta en obra del producto, es del tipo “cuna a

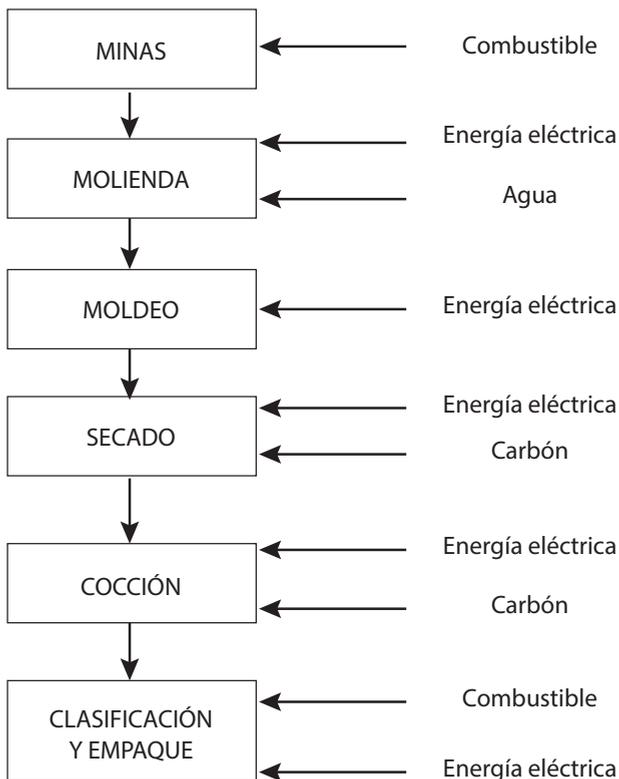
puerta”, de manera que quedan incluidos dentro del sistema todos los módulos de la etapa de producto (A1-materias primas, A2-transporte y A3-fabricación).

28.3.1 Módulos incluidos dentro del estudio

De acuerdo con la clasificación y codificación de la norma EN-15804, los procesos del ciclo de vida de los productos cerámicos que se incluyen dentro de los límites del sistema se pueden resumir en los siguientes:

- Extracción de la arcillas. Minas (A1).
- Transporte de materias primas a planta de producción (A2).
- Almacenamiento, carga y molienda (A3a).
- Moldeo (A3b).
- Secado (A3c).
- Cocción (A3d).
- Clasificación y empaque (A3e).

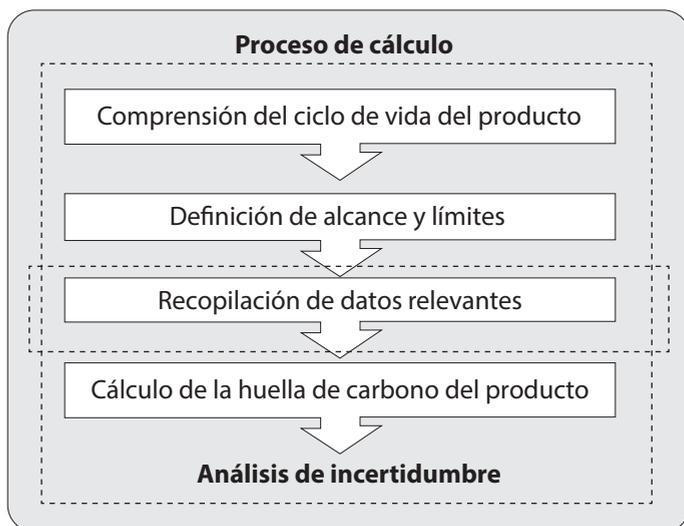
Figura 18. Esquema de proceso de fabricación y entradas en el sistema



28.3.2 Recogida de datos. Análisis de inventario

El análisis de inventario o recopilación de la información relevante es la fase más importante del todo el proceso de cálculo de la huella de carbono y energía embebida. Los datos que se van a incluir en el inventario deben recopilarse para cada proceso unitario incluido dentro de los límites del sistema.

Figura 19. Etapa de análisis de inventario en el proceso de cálculo (PAS 2050:2011)



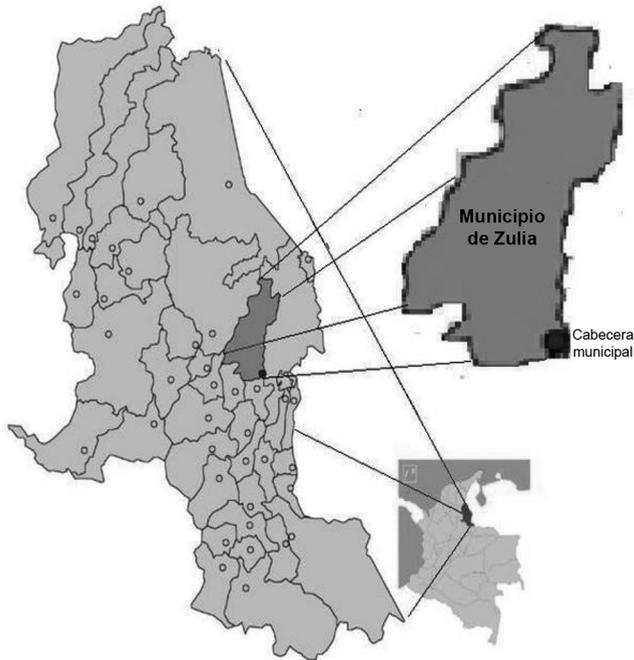
El análisis de inventario o la recogida de datos/información se realiza, como se ha comentado, por dos vías distintas:

- Recogida de información en fábrica y canteras (ladrillera, mina y central termoeléctrica).
- Recopilación bibliográfica.

28.4 Datos de planta de extracción de arcillas

De esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible empleado por la maquinaria (petrodiesel) de extracción. Quedan fuera del estudio el resto de elementos, al interpretar *a priori* que el impacto producido por ellos será mínimo con relación a la carga total del producto estudiado (p.e., aceites de mantenimiento de maquinaria o neumáticos).

En el presente estudio se consideran, para la etapa de extracción de arcillas, las canteras que tiene disponible una empresa cerámica en el municipio de El Zulia, situado en la subregión oriental del departamento Norte de Santander, con una superficie de 449.07 km², equivalente al 0,22% del área total del departamento.

Figura 20. Localización del área de extracción de arcillas

Este terreno es apto para la ejecución de las labores de explotación necesarias de la materia prima arcillosa para su posterior beneficio en la planta de procesamiento. El terreno cuenta con una vía de acceso en buen estado, así como con un frente de explotación de 250 m apropiado para la extracción de la arcilla. También se ha adecuado un sitio especial para el depósito de estériles, como el producido en la operación de descapote y preparación del frente de explotación, y también de las capas de arenisca que suprayacen a los mantos arcillosos, cumpliendo de esta manera parte importante de la normatividad ambiental vigente.

Para el caso de la ladrillera se consideran dos tipos de arcillas: arcilla roja y arcilla gris rojiza, cuya mayor diferencia es el porcentaje de arena que presentan.

Figura 21. Área de extracción de arcillas (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)



Los datos más relevantes recogidos, relativos a la extracción de arcillas como materia prima para la fabricación de productos cerámicos, son los siguientes:

- Maquinaria de extracción, consumos (petrodiesel) y rendimientos:
 - » Excavadora: 6,6 gal/h y 66 t/h.
 - » Bulldozer: 4,8 gal/h y 66 t/h.
 - » Cargador: 2,04 gal/h y 144 t/h.
 - » Caterpillar: 3,6 gal/h y 36 t/h.

Figura 22. Carga de arcillas para transporte a planta (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)



28.5 Datos de planta generadora de cenizas volantes

La central termoeléctrica se ubica en San Cayetano, Norte de Santander. Cuenta con una capacidad de generación de 155 MW y consiste en una unidad turbogeneradora a vapor, compuesta por una turbina de dos cilindros en tándem,

de tres etapas, con doble exhosto al condensador y seis extracciones. Opera con vapor a 127 kg/cm^2 y $538 \text{ }^\circ\text{C}$ y tiene un generador de 204.400 kVA, totalmente cerrado, enfriado por hidrógeno y factor de potencia 0,85. Está provista de una caldera colgante, de un tambor, radiante, con recirculación y circulación natural, la cual utiliza carbón pulverizado. Produce 495 t/h de vapor a $538 \text{ }^\circ\text{C}$ y 127 kg/cm^2 . Tiene precipitadores electrostáticos y altura de chimenea de 90 m para protección del medio ambiente.

La unidad tiene un consumo térmico específico garantizado de 2.410 kcal/kWh y una eficiencia neta de 35,7%.

Figura 23. Vista de la central termoeléctrica (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008)



Para el estudio comparativo de huella de carbono, los datos más relevantes recogidos en esta planta, relativos al nutriente tecnológico para ser utilizado como materia prima en sustitución de la arcilla para la fabricación de productos cerámicos, son los relativos al proceso de carga del producto en camiones para su transporte a la planta de producción cerámica:

- Maquinaria de carga, consumos (petrodiesel) y rendimientos:
 - » Para cargador: 2,04 gal/h (7,72 l/h) y 144 t/h.

28.6 Datos de transporte de materias primas a planta de producción

Al igual que ocurre en el caso de la extracción de materias primas de las canteras, de esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible (considerando petrodiesel). Quedan fuera del estudio el resto de elementos, al interpretar *a priori* que el impacto producido por ellos será mínimo con relación a la carga total del producto estudiado.

Según la información recogida, y para hacer comparaciones tanto para la arcilla recogida en la mina como para las cenizas recogidas en la central termoeléctrica, se considera un camión de transporte tipo volquete (el mismo tanto para el transporte de arcillas como para el transporte de cenizas volantes), con las siguientes características técnicas:

- Volumen de caja: 18,00 m³.
- Carga útil máxima: 24,00 t.
- Potencia máxima de motor: 240,00 km/h.
- Velocidad media de desplazamiento: 40 km/h.
- Consumo medio 100 km: 10,30 gal (38,99 l).

Figura 24. Modelo de volqueta utilizado en el estudio



Las distancias consideradas desde la zona de extracción de materias primas hasta la planta de producción son las siguientes:

- Distancia mina-ladrillera: 22 km.
- Distancia central termoeléctrica-ladrillera: 18 km.

Figura 25. Distancia desde la central termoeléctrica a la ladrillera del sector cerámico (ArcGIS webmap)



Se considera el recorrido ida/vuelta ya que no puede ser aprovechado el recorrido de vuelta por los camiones para carga de otro tipo de producto.

Es importante tener en cuenta que la determinación del consumo medio es de cierta complejidad ya que el consumo de un vehículo depende de su motor y transmisión, carrocería, condiciones de tránsito, la carga que lleve, su aerodinámica, las condiciones de uso y manejo, y otros factores difícilmente cuantificables, variables que influyen en el consumo unitario por unidad declarada.

28.7 Datos de planta de producción

La colaboración de la industria cerámica resulta vital para obtener datos reales y de primer orden con los que posteriormente se realizan los cálculos para la obtención de la energía embebida y las emisiones de CO₂ asociadas al producto cerámico tipo y al innovador con nutrientes tecnológicos.

Para el cálculo, con base en datos reales, se ha tomado como referencia de planta de fabricación una ladrillera del sector cerámico.

Figura 26. Ubicación de la ladrillera del sector cerámico (ArcGIS webmap)



La selección se ha realizado intentando que la industria seleccionada sea representativa del sector del Norte de Santander, siguiendo estos criterios:

- Que posea una tecnología de producción acorde con la media nacional, es decir, que el proceso de producción y los equipos utilizados no estén obsoletos ni estén en vanguardia dentro del sector.
- Que se sepa, de antemano, que disponen de datos de consumos, producción, rendimientos de maquinaria, etc.

De este modo se selecciona la ladrillera del sector cerámico y se contacta con sus responsables, con el fin de conseguir la aceptación para colaborar en la realización del estudio y concretar una fecha de visita para realizar la toma de datos necesaria.

La empresa ladrillera del sector cerámico se encuentra ubicada vía a El Zulia en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander. Cuenta con experiencia en la explotación, transformación y comercialización de productos derivados de la arcilla, con estándares de la más alta calidad, en la obtención de productos terminados: tableta, tablonés, guardaescobas, escaleras, entre otros.

Los datos recogidos en esta empresa para el cálculo de la huella de carbono y energía embebida, referentes a la producción, y para cada una de las etapas del proceso, son los siguientes:

- *Almacenamiento, carga y molienda*

Una vez llegan las arcillas a la planta de producción, se realiza un almacenamiento. Para ello se dispone de dos áreas cubiertas por dos estructuras metálicas consecutivas. El material se almacena en forma de montaña o pilas, las cuales están dispuestas de acuerdo al tipo de arcilla: roja y gris rojiza. Otra pila corresponde al material de productos no conformes y recortes. El tiempo mínimo de homogeneización de la arcilla en galpón es de 15 días, para finalmente hacer una mezcla ideal.

Posteriormente se traslada el material por medio del cargador a las respectivas tolvas alimentadoras, donde es suministrado gradualmente a los molinos de martillos, comenzando el proceso de molienda.

Los datos recogidos correspondientes a las palas cargadoras se corresponden con un *consumo de 2,04 gal/h (7,72 l/h) y un rendimiento de 144 t/h.*

Figura 27. Carga de arcillas en tolva (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)



En el proceso de molienda se utilizan molinos de martillos y bandas transportadoras. En los molinos de martillos se reduce el tamaño del grano del material, y luego este es desplazado verticalmente por un elevador de cangilones hasta el tamiz de malla 10, donde se clasifica el material de acuerdo al tamaño de la partícula. La energía consumida en esta etapa es de *origen eléctrico (10.800 kW/h), con un rendimiento de 4,13 kWh/t.*

- *Moldeo y extrusión*

La pasta, después del mezclado, pasa al proceso en donde se le aplica la presión de vacío para compactarla. Posteriormente pasa por la boquilla ubicada a la salida de la máquina, lo que da como resultado el embutido en el tamaño deseado. Después se corta y se decora con el diseño solicitado en tabletas, otoño, lisa o rombo, además de tejas, bloques y ladrillos cara vista.

Finalmente, el producto se revisa y se desliza para desfilarlo. El sobrante que se obtiene es enviado nuevamente al proceso para su reutilización. La maquinaria utilizada en esta fase incluye: mezcladoras, laminadores, extrusoras y cortadoras.

La energía consumida en esta etapa es de origen eléctrico: 6,92 kWh/t.

- *Secado*

El secadero utilizado es de cámaras. El secado artificial se lleva a cabo en un espacio cerrado, en el cual se inyecta aire caliente extraído del calor resultante

del enfriamiento de los hornos que recircula en el secadero por medio de un ventilador que se encuentra en continuo desplazamiento.

Figura 28. Entrada de productos en el secadero de cámaras (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)



La energía consumida en esta etapa es de *origen eléctrico*: 180 kWh/t.

- *Cocción*

En la operación de cocción se utilizan hornos tipo colmena de llama. Se inicia con el cargue del horno, en el cual se coloca el material seco en paquetes con una disposición particular a lo largo de la dimensión máxima de este. Esto se realiza de forma manual y carreta con 14 operarios. El combustible utilizado es carbón térmico, con apoyo de energía eléctrica.

La curva de cocción es de 70 h, con un *consumo de carbón de 15,00 t/quema*. La capacidad del horno es de 180,00 toneladas de producto cocido por quema. El consumo eléctrico es de 10,80 kWh/t. El porcentaje de roturas es de del 2%.

Figura 29. Hornos colmena y carga de carbón en hornos (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)





- *Clasificación y empaque*

Los productos terminados que se encuentran en el patio se clasifican según su color, que puede ser: rojo, canela, mate y colonial. Luego se realiza una selección del material según las características que presenta tales como: nivel de torcedura, manchas en la superficie de la tableta, desportillado, partiduras o fisuras.

El material de primera se empaca con plástico membreado con el logo de la empresa. El material tipo comercial se empaca en plástico transparente, y el material tipo retal no se empaca. Seguidamente, se almacena para su distribución y comercialización.

La maquinaria utilizada en esta etapa son *túneles termoencogibles de empaqueo*, con un consumo eléctrico de 2,82 kWh/t.

Figura 30. Empaque de producto acabado (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)



- *Transporte de producto acabado*

Aunque, como se ha comentado, el estudio comparativo que se realiza es del tipo de cuna a puerta, es decir, no se tiene en cuenta el impacto asociado a las emisiones de transporte del producto acabado, sí que merece la pena, únicamente a título informativo, mencionar el mercado de los productos objeto del estudio. Los productos son vendidos a mercados tanto nacionales como internacionales, con porcentajes de participación de 80 y 20% respectivamente (tabla 40).

Tabla 40. Mercados a nivel nacional e internacional

A nivel nacional	Km	A nivel internacional	Km
Cúcuta	14,8	Ecuador	1.802,2
Bogotá	571,3	Venezuela	1.764,4
Cali	966,5	Costa Rica	2.140,2
Medellín	596,9	República Dominicana	1.245,5
Barranquilla	659,3	Puerto Rico	1.328,0
Villavicencio	691,7	-	-
Ipiales	1.433,1	-	-
Sogamoso	396,4	-	-

28.8 Datos bibliográficos

Aunque se considera que los datos recogidos son de calidad suficiente para alcanzar los resultados esperados, resulta siempre conveniente disponer de datos de fuentes bibliográficas contrastadas, sobre todo para datos que no pueden ser recabados de manera directa en la encuesta realizada en la planta de producción.

Las principales fuentes bibliográficas de donde se ha extraído información, además de los estudios previos existentes en la materia (indicados en el capítulo de estado del arte), han sido las siguientes:

- Base de datos FECOC (Amell *et al.*, 2016).
- Inventario de gases de efecto invernadero (IPPC, 2006).
- Datos sectoriales de los sectores eléctricos, térmico y de transporte.
- Corinair (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2016).

Además de estas fuentes de datos, se tienen en cuenta también otras bases específicas del sector y los informes estadísticos anuales de las asociaciones sectoriales. Merece especial mención, por la importancia que tiene dentro del objeto del estudio (aparte del térmico), el sector eléctrico.

28.9 Los factores de emisión

Con el fin de estimar las emisiones generadas por las diversas fuentes, la metodología IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) sugiere utilizar factores de emisión apropiados para cada caso. Los factores de emisión son herramientas que permiten estimar la cantidad de emisiones de un determinado contaminante, generada por la fuente en estudio. Varían no solamente de acuerdo con el tipo de combustible sino con la actividad en la que se aplique su proceso de combustión (p.e., generación de energía, procesos industriales, aplicaciones residenciales) y la tecnología utilizada para tal fin (p.e., calderas, hornos, estufas). En este sentido, existen factores de emisión por combustible, proceso y tecnología, de tal manera que, en la medida en que se avanza en el grado de detalle, el factor de emisión resulta más exacto.

Generalmente, los factores de emisión se expresan como el peso de contaminante emitido por unidad de peso, volumen, energía o actividad, dependiendo del nivel escogido. Así, un factor de emisión de monóxido de carbono para el gas natural igual a 18 corresponderá a 18 kg de CO generados por TJ (o sus unidades correspondientes) de gas natural alimentado en el proceso de combustión (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2003).

Por lo tanto, para convertir los consumos energéticos obtenidos en el capítulo anterior en emisiones de CO₂ asociadas, es necesario utilizar factores de emisión y conversión aceptados internacionalmente.

En el marco del proyecto Mecanismo de Mitigación Voluntaria de Gases de Efecto Invernadero Colombia (MVC), adelantado por la Fundación Natura, la Bolsa Mercantil y la Corporación Ambiental Empresarial, con el acompañamiento y coordinación de la UPME y el MADS, se desarrolló una consultoría técnica para la actualización de la base de datos de los factores de emisión de los combustibles colombianos (FECOC) (Carrasco, 2014), factores que son los utilizados para el cálculo de huella de carbono y energía embebida en el marco de la presente tesis.

28.9.1 Combustible para elementos de transporte y extracción

Como ha quedado reflejado en los datos recogidos en la encuesta realizada, el combustible utilizado en los elementos de extracción de materias primas y transporte es el petrodiesel: gasóleo extraído del petróleo. Se diferencia del biodiesel, que es el gasóleo extraído del aceite vegetal. En Colombia se lo denomina ACPM, que son las siglas de aceite combustible para motores.

Químicamente, este combustible está constituido por una mezcla de hidrocarburos, la cual se obtiene a través de la destilación del petróleo, realizada de forma fraccionada y a una temperatura que puede variar entre 250°C y 350°C.

Entre otras de sus características, las industrias petroquímicas señalan que el biodiésel o ACPM resulta muchísimo más económico de producir que la gasolina, precisamente porque su proceso de refinamiento suele ser mucho más sencillo. En sintonía con esto, el ACPM contaría con mayores concentraciones de azufre y otros minerales (Minminas, s.f.).

Así mismo, al ser un compuesto mucho menos refinado que la gasolina, el ACPM resulta también mucho más rendidor, es decir que presenta hasta dieciocho por ciento más energía que la gasolina, en cuanto a sus unidades de volumen. De hecho, algunas fuentes han llegado a señalar que, además de rendir mucho más que la gasolina, el diésel constituye un combustible que puede incluso durar hasta el doble que la gasolina (UPME, 2010). En tal sentido, también resulta mucho más eficiente con respecto al rendimiento de la gasolina, por lo que un motor de diésel suele ser mucho más eficiente. De manera que no es de extrañar que desde su invención se haya venido implementando en actividades como la calefacción de hogares, la generación de electricidad, combustible de maquinarias y últimamente de vehículos modernos, que buscan aprovechar lo económico de su producción y el mayor rendimiento de la energía que produce, en comparación con la gasolina.

De acuerdo con la información de FECOC 2016 (Amell *et al.*, 2016), el factor de emisión considerado para el ACPM es $10,28 \text{ kgCO}_2/\text{galón}$ ($2,95 \text{ kgCO}_2/t$). Para el cálculo de energía embebida, se obtiene un PCI para el ACPM de $38,16 \text{ kWh/galón}$ ($11,71 \text{ kWh/kg}$).

28.9.2 Carbón térmico

El carbón térmico es la fuente energética utilizada en el proceso de cocción para el caso de estudio (ladrillera del sector cerámico). El carbón es el combustible fósil más abundante en la naturaleza, con 860.938 Mt.

En reservas mundiales medidas a finales del 2010, se tiene que las mayores reservas por país se encuentran en Estados Unidos con el 27,6%, Rusia con el 18,2%, China con el 13,3%, con Australia el 8,9% e India con el 7,0%, mientras que Colombia se ubica en el decimoprimer lugar con 6.593,4 millones de toneladas equivalentes al 0,8% (Araújo Ibarra & Asociados S.A., 2006).

Las principales actividades que componen la cadena colombiana del carbón pueden explicarse en las siguientes etapas:

- Exploración-reservas y calidades.
- Desarrollo y montaje, preparación y explotación (producción).
- Clasificación y lavado del carbón.

- » Transformación del carbón, en la producción de coque y otros procesos.
- » Transporte desde la mina hasta el sitio de beneficio y los patios de acopio.

- Comercialización y distribución.

Colombia cuenta con recursos de carbón de excelente calidad. Las reservas medidas son de 6.508 Mt, distribuidas en las tres cordilleras: Oriental, Central y Occidental (Universidad de los Andes, Centro de Estudios de Fronteras e Integración, s.f.):

- La Guajira = 3.694,61 Mt.
- Cesar = 1.563,93 Mt.
- Córdoba = 378,17 Mt.
- Cundinamarca = 221,81 Mt.
- Boyacá = 153,92 Mt.
- Norte de Santander = 105,34 Mt.
- Antioquia = 87,47 Mt.
- Valle del Cauca y Cauca = 40,52 Mt.

Las principales zonas mineras de Norte de Santander están en Catatumbo, con 43,63 Mt; Zulia-Chinácota, con 34,01 Mt; y Tasajero, con 11,46 Mt.

Figura 31. Carga de carbón (inferior) para transporte a planta (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2003)



Las principales características del carbón térmico explotado en la zona son las siguientes:

- Poder calorífico: 7.000 kg/kg (normas de emisiones, Resolución 989).
- Concentración MP: 250 mg/m³.
- Concentración SOx: 550 mg/m³.

- Concentración NOx: 550 mg/m³.
- Concentración de HF: 8 mg/m³.
- Concentración de HCl: 40 mg/m³.

De acuerdo con la información de FECOC 2016, el factor de emisión considerado para el *carbón térmico de Norte de Santander* es de 2.812,75 kgCO₂/tonelada (Amell *et al.*, 2016).

28.9.3 El sector eléctrico en Colombia. *Mix* eléctrico

El sector eléctrico en Colombia está mayormente dominado por generación de energía hidráulica (66% de la producción) y generación térmica (33%). No obstante, el gran potencial del país en nuevas tecnologías de energía renovable (principalmente eólica, solar y biomasa) apenas si ha sido explorado. Las grandes plantas de energía hidráulica y térmica dominan los planes de expansión actuales.

Una característica interesante del sector eléctrico de Colombia (así como de su sector de abastecimiento de agua) es la existencia de un sistema de subsidios cruzados desde usuarios que viven en áreas consideradas como relativamente afluentes, y de usuarios que consumen cantidades de electricidad superiores a aquellos que viven en áreas consideradas pobres y quienes usan menos electricidad (UPME (2017)).

Figura 32. Distribución de sistemas de generación de electricidad en Colombia (UPME, 2010)

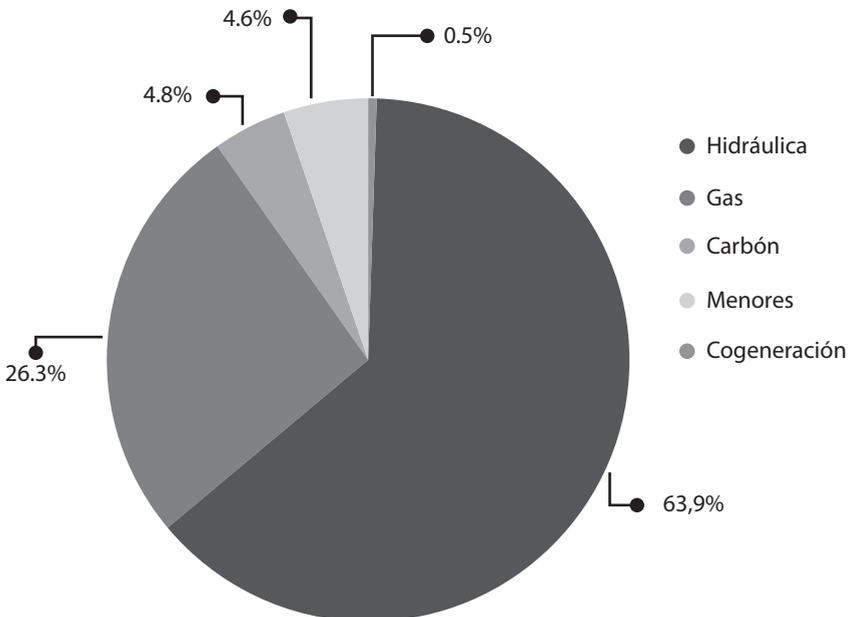
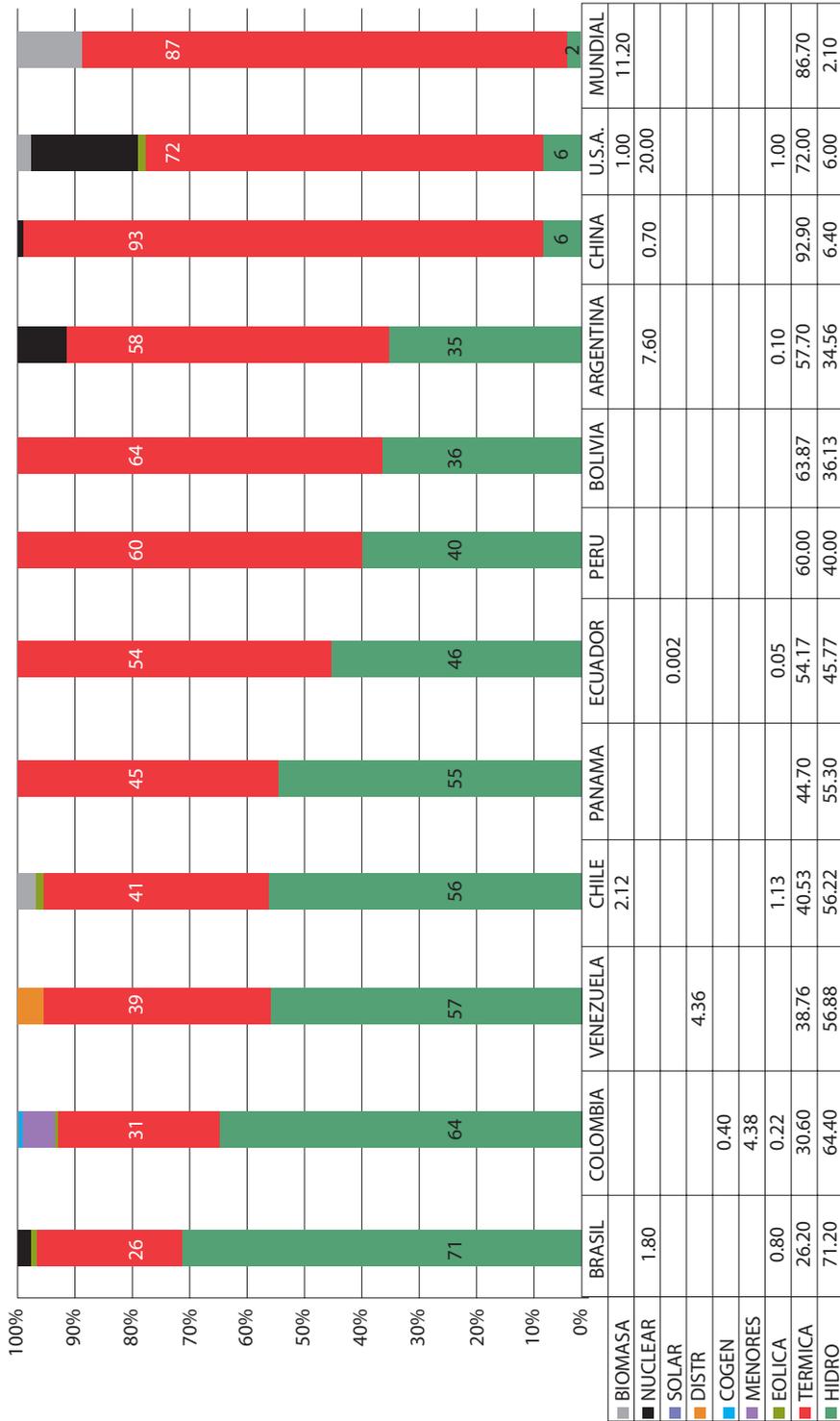


Figura 33. Matriz eléctrica por capacidad instalada (UPME, 2017)



Con base en la matriz o *mix* eléctrico para Colombia, se determinan las emisiones asociadas a cada kWh que se consume en el punto de destino (energía final).

De acuerdo con los datos ofrecidos por la UPME, para el año 2016 el indicador de emisiones de $CO_{2\text{equiv}}$ por kWh de energía eléctrica consumido se encontraba en 120 gramos de CO_2 por kWh (UPME, 2017). Este valor se encuentra muy por debajo de valores de otros países debido a la procedencia (hidroeléctrica) de las fuentes de generación.

Tabla 41. Análisis comparativo de emisiones CO_2 en Colombia por generación eléctrica (Sistema de Información Eléctrico Colombiano)

País	Factor emisión generación [g CO_2 /kWh]
China	764
Estados Unidos	542
Bolivia	498
México	467
Chile	375
España	361
Ecuador	354
Argentina	343
Panamá	300
Perú	195
Colombia	120
Brasil	81

29. Análisis de los datos obtenidos

Una vez finalizada la fase de inventario, y a partir de la información obtenida en las industrias, completada y contrastada con información de bases de datos y fuentes bibliográficas, se pueden exponer, a modo de resumen, las siguientes conclusiones:

- Los datos recogidos en la mina, la central termoeléctrica y la ladrillera, completados con bases de datos, se consideran suficientes para poder llevar a cabo con garantías las siguientes fases de estudio.
- En lo referente a la subetapa de minas, solo se considera como relevante para el cálculo de la HdC y de la energía embebida del producto el consumo energético (petrodiesel) de la maquinaria de extracción. Este consumo está en función de factores tales como el rendimiento de la maquinaria, la accesibilidad, la

naturaleza del terreno, la climatología, la habilidad del operador, las distancias de trabajo, el estado de conservación de la maquinaria, etc.

- En el caso del transporte a planta de las materias primas, se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible (petrodiesel), de manera que quedan fuera del estudio el resto de elementos al interpretar, *a priori*, que el impacto producido por ellos será mínimo con relación a la carga total del producto estudiado. La determinación del consumo medio es, a su vez, de cierta complejidad, aunque el factor más importante para tener en cuenta es la distancia de canteras a planta de producción.
- Respecto de la etapa de fabricación, la etapa más crítica, como ya se ha comentado, es la cocción del producto.

Con base en estas conclusiones, se entiende que los datos obtenidos son perfectamente válidos para el estudio comparativo, que se pretende llevar a cabo en este apartado, de cómo afecta a la reducción de la huella de carbono y de energía embebida de producto la introducción de nutrientes tecnológicos, aplicado a la región Norte de Santander.

En este punto resulta muy importante recalcar que no se consideran en el presente estudio otros datos aspectos que tienen su propia importancia medioambiental, dado que el objeto del estudio que se lleva a cabo en este apartado es determinar la mejora medioambiental que se produce, en específico, en el proceso de fabricación de productos cerámicos con la incorporación de nutrientes tecnológicos respecto del proceso de fabricación convencional.

En este sentido, se entiende que aspectos que tienen especial relevancia en el proceso de fabricación de productos cerámicos, medioambientalmente hablando, no se ven alterados al utilizar los nutrientes tecnológicos:

- Reducción de residuos por roturas de cocción.
- Emisiones de transporte de producto acabado a obra.
- Impacto ambiental asociado a la vida útil del producto una vez puesto en el edificio.
- Tratamiento del producto cerámico al final de la vida útil.

30.Efectos energéticos asociados al proceso de fabricación

Para el análisis se han tenido en cuenta dos consideraciones. La primera de ellas es el aporte energético de residuo, en este caso el uso del 10% de ceniza volante en la pasta, y la segunda es la disminución del calor de reacción ocasionada por la disminución de la cantidad de caolinita y de agua físicamente adsorbida/absorbida en la pasta cerámica.

Las condiciones iniciales para el establecimiento de operaciones matemáticas son:

1. Cocción a 900 °C para la producción de cerámicos de construcción tipo bloque de cerramiento.
2. 30.000 bloques cargados a un horno tipo colmena
3. Peso de un bloque cocido (peso aprox.) de 6,0 kg.
4. Combustible usado para el proceso tradicional de cocción de bloque: 15.000 kg de carbón mineral.

30.1 Características de materias primas

Acorde con los resultados de caracterización presentados en el apartado anterior, se tiene que el material arcilloso presenta una pérdida de masa hasta 900 °C de 6,3% (ver tabla 11), que está asociada principalmente a agua físicamente adsorbida/absorbida y al proceso de deshidroxilación de la caolinita (ver figura 20). Sobre este tipo de agua, el análisis termogravimétrico permitió establecer que este valor es cercano al 1,5%. La concentración de caolinita en el material, acorde con la tabla 15 es de 14,4%, y la pérdida de masa, acorde con el resultado de TG, es de 4,4%.

En relación con la ceniza volante, la pérdida de calcinación corresponde al 7,4 %. El 99% de las pérdidas se asocia a la oxidación de materia orgánica residual del carbón mineral, acorde con el análisis de TG presentado en la figura 32

- *Calor aportado por la materia orgánica presente en CT10:*

Masa cargada al horno = 191.340,00 kg

Masa de ceniza volante cargada al horno = 19.134,00 kg

Poder calorífico de la ceniza acorde con DSC (figura 32 = 1.784 kJ/kg)

Calor aportado por la ceniza cargada al horno asumiendo combustión total = 34.135,06 kJ

Asumiendo que al estar inmerso en la pasta cerámica solo el 70% del carbono residual presente en la ceniza pueda oxidarse (ver figura 40, asociada a efecto de corazón negro a esta temperatura de cocción) y que el poder calorífico no se ve afectado por reacciones de pirólisis, el calor aportado al sistema sería de 23.894.539,2 kJ.

Carbón mineral equivalente = Calor exotérmico aportado por la ceniza volante/
Poder calorífico del carbón mineral de la región

Poder calorífico del carbón de la zona = 7.000 kcal/kg (29.330 kJ/kg).

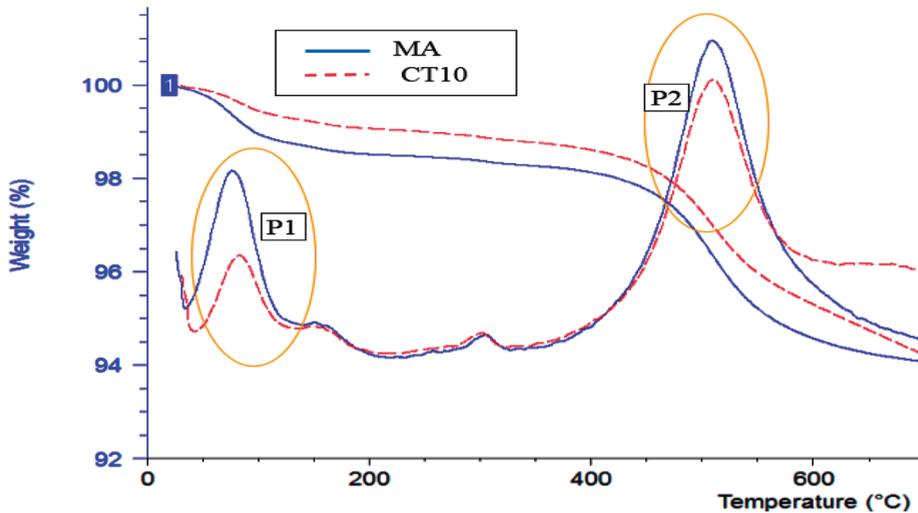
Carbón mineral equivalente = 814,68 kg *carbón de mineral*

- *Ahorro energético por reducción del agua higroscópica y del agua de composición:*

Masa cargada al horno = 191.340,00 kg

Para determinar la masa de agua físicamente adsorbida/absorbida que se reduce por usar 10% ceniza volante en la pasta, se realizó un test de análisis termogravimétrico (ver figura 79) usando la misma masa en el crisol (masa después de proceso de secado). De esta manera se observó que la presencia de ceniza volante contribuye a reducir la cantidad de este tipo de fase en la pasta cerámica.

Figura 34. Perfil TG de la pasta CT10 (atmósfera de aire)



El análisis de los perfiles de la figura 79 permite establecer que el agua físicamente adsorbida/absorbida pasó del 1,5% a 0,71%.

El calor requerido para evaporar el agua que se reduce por uso de 10% de CV (joules) es 4.400.982,65 kJ, que ya no es necesario adicionar al sistema cuando se usa la pasta CT10 en vez de MA.

Para la eliminación del agua de composición se realizaron los cálculos con base en la cantidad de caolinita medida por refinamiento Rietveld y el valor de sustitución de la ceniza volante acorde con el siguiente proceso:

Caolinita cargada al horno con solo material arcilloso = 27.139,67 kg *de caolinita*

Calor asociado a deshidroxilación = 949.888,45 kJ

Entonces, el calor total que se reduce por el uso de CT10 en vez de MA es:

Calor total reducido = Calor por agua físicamente adsorbida/absorbida +
Deshidroxilación caolinita

Calor total reducido = 949.888,45 + 4.400.982,65 kJ

Calor total reducido = 5.350.871,1 kJ

Carbón equivalente = Calor total reducido/Poder calorífico del carbón mineral.

Carbón equivalente = 182,44 kg de carbón de Norte de Santander

Aporte energético del residuo del 10% de ceniza empleado en la pasta = 814,68 kg

Disminución del calor de reacción por la eliminación de la cantidad de caolinita y
el agua físicamente absorbida en la pasta = 182,44 kg

Total = 997,12 kg de carbón de Norte de Santander

30.2 Efecto sobre la energía embebida en el material cerámico

Este valor corresponde a un ahorro de combustible para los empresarios. Al ser llevado al número de operaciones promedio de las empresas de la región (cuatro quemas al mes, usando cuatro hornos colmena en promedio durante doce meses, para un total de 192 quemas/año), daría un ahorro de 191.447,04 kg/año de carbón, es decir, 191,45 t/año que podrían ser usadas para realizar 12,76 operaciones o lotes de cocción en el horno colmena para este tipo de producto. En términos monetarios, sería un valor de COP 37.440.000 por año, que equivale a USD 124.800. Esto corresponde a un ahorro del 7,67% del costo del carbón por año.

31. Evaluación de impactos. Proceso convencional

En este capítulo se procede a convertir las entradas obtenidas en el capítulo anterior en cargas ambientales referidas a emisiones equivalentes de CO₂ (CO_{2equiv}). Paralelamente, y para el cálculo de la energía embebida, se suman todas las cargas energéticas (térmica y eléctrica) de cada uno de los diferentes procesos incluidos dentro de los límites del sistema.

Una vez obtenidos los datos relacionados con las distintas materias, actividades y procesos relacionados con el ciclo de vida del producto (dentro de los límites de sistema establecidos), se realizan los balances de masas de cada fase del proceso y se aplican los factores de emisión.

El conjunto de emisiones generadas a lo largo de las etapas consideradas dentro de los límites del sistema dará lugar a las emisiones de CO_{2equiv} por unidad declarada

de producto, y así se obtiene la HdC. La misma operación, pero con las cargas energéticas, se sigue para los cálculos de energía embebida.

31.1 Clasificación y organización de datos

La HdC total para cada uno de los productos en estudio dentro de la presente tesis, y para los límites de sistema definidos, viene definida por la siguiente fórmula:

$$\text{HdC}(\text{total}) = \text{HdC}(\text{A1}) + \text{HdC}(\text{A2}) + \text{HdC}(\text{A3a}) + \text{HdC}(\text{A3b}) + \text{HdC}(\text{A3c}) + \text{HdC}(\text{A3d}) + \text{HdC}(\text{A3e})$$

Donde:

HdC(total) es la huella de carbono total ($\text{kgCO}_{2\text{equiv}}/\text{t producto}$).

Los sumandos son la HdC de cada una de las etapas:

HdC(A1): Extracción materias primas. Minas.

HdC(A2): Transporte materias primas a planta.

HdC(A3a): Almacenamiento, carga y molienda.

HdC(A3b): Moldeo.

HdC(A3c): Secado.

HdC(A3d): Cocción.

HdC(A3e): Clasificación y empaque.

Del mismo modo, la energía embebida total para cada uno de los productos en estudio, y para los límites de sistema definidos, vendrá definida por la siguiente fórmula:

$$\text{Ee}(\text{total}) = \text{Ee}(\text{A1}) + \text{Ee}(\text{A2}) + \text{Ee}(\text{A3a}) + \text{Ee}(\text{A3b}) + \text{Ee}(\text{A3c}) + \text{Ee}(\text{A3d}) + \text{Ee}(\text{A3e})$$

Donde:

Ee(total) es la energía embebida total de producto ($\text{kWh}/\text{t producto}$).

Los sumandos son la Ee de cada una de las etapas consideradas

Ee(A1): Extracción materias primas. Minas.

Ee(A2): Transporte materias primas a planta.

Ee(A3a): Almacenamiento, carga y molienda.

Ee(A3b): Moldeo.

Ee(A3c): Secado.

Ee(A3d): Cocción.

Ee(A3d): Clasificación y empaque.

A continuación se procede al cálculo de los valores de cada uno de los sumandos de las fórmulas propuestas.

31.1.1 Extracción (A1)

El consumo unitario para la etapa de extracción viene dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo unitario (l/t)} = \frac{\text{Consumo maquinaria (l/h)}}{\text{Rendimiento (t/h)}}$$

A partir de los consumos de las maquinarias de extracción y los rendimientos de estas, obtenidos en la fase de inventario:

- Excavadora: 0,1000 gal/ton (0,3785 l/t).
- Bulldozer: 0,0727 gal/ton (0,2752 l/t).
- Cargador: 0,0142 gal/ton (0,0536 l/t).
- Volqueta: 0,1000 gal ton (0,3785 l/t).

Se obtiene un consumo unitario total de 0,29 gal/t (1,09 l/t) de arcilla extraída:

HdC A1 = Consumo unitario * Factor emisión

$$\text{HdC A1} = 2,95 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/\text{t}$$

Referido a *tonelada de arcilla (materia prima) extraída*.

Para el caso de la Ee, se aplica la siguiente fórmula:

Ee A1 = Consumo unitario * Factor conversión

$$\text{Ee A1} = 1,09 * 10,07 = 10,93 \text{ kWh/t}$$

31.1.2 Transporte a planta (A2)

Al igual que ocurre en el caso de la extracción de materias primas de las canteras, de esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible.

El consumo unitario viene dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo unitario (l/t)} = \frac{C_v}{C_t} * D * 2$$

Donde:

Cv: Consumo vehículo transporte (l/km).

Ct: Carga vehículo transporte (t).

D: Distancia recorrida desde la cantera a la planta.

2: Factor fijo (al considerar el recorrido de ida y de vuelta).

Para el cálculo preciso para cada caso concreto, habría que considerar las tres variables indicadas. Por tanto:

$HdC A2 = \text{Consumo (l/ton} \times \text{km)} \times (\text{Distancia (km)} \times 2) \times \text{Factor emisión (kg CO}_{2\text{equiv}}/\text{l})$

$$HdC A2 = 1,94 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

Referido a *tonelada de arcilla (materia prima) transportada*.

Para el caso de la energía embebida, se aplica la siguiente fórmula:

$Ee A2 = \text{Consumo (gal/ton} \times \text{km)} \times (\text{Distancia (km)} \times 2) \times \text{Factor conversión (kWh/gal)}$

$$Ee A2 = 7,20 \text{ kWh/t}$$

31.1.3 Fabricación de productos (A3)

Se desglosa, al igual que en la fase de inventario, el cálculo de la HdC y Ee para cada una de las subetapas de la etapa de fabricación de productos.

➤ Almacenamiento, carga y molienda (A3a)

Se incluye el impacto asociado a los consumos de los equipos y maquinaria utilizados desde que depositan las arcillas a pie de planta hasta que el producto pasa a la fase de moldeo.

A partir de la información reflejada en el capítulo de inventario, y de las conclusiones que figuran en este capítulo, la huella de carbono tendrá, por un lado, un valor asociado al consumo eléctrico de la maquinaria y, por otro, el valor del consumo del combustible de la pala cargadora. Con base en estas consideraciones se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de HdC:

$$HdC A3a = (Ce \times Fee) + (Cc \times Fec)$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Fee: Factor emisión electricidad (kgCO_2/kWh).

Cc: Consumo unitario combustible.

Fec: Factor emisión combustible.

$$\text{HdC A3a} = 0,64 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

De la misma forma, se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de Ee:

$$\text{Ee A3a} = (\text{Ce}) + (\text{Cc} * \text{Fc})$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Cc: Consumo unitario combustible.

Fc: Factor conversión.

$$\text{Ee A3a} = 4,67 \text{ kWh/t}$$

Los resultados obtenidos, tanto de huella de carbono como de energía embebida, están referidos a *tonelada de arcilla cargada en tolva*.

► **Moldeo (A3b)**

Se incluye el impacto asociado a los consumos de los equipos y maquinaria utilizados desde que depositan hasta que el producto queda moldeado y listo para pasar a la fase de secado.

A partir de la información reflejada en el capítulo de inventario, y de las conclusiones que figuran en este capítulo, la huella de carbono tendrá un valor asociado únicamente al consumo eléctrico de la maquinaria. Con base en estas consideraciones se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de HdC:

$$\text{HdC A3b} = (\text{Ce} * \text{Fee})$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Fee: Factor emisión electricidad (kgCO_2/kWh).

$$\text{HdC A3b} = 0,83 \text{ CO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será $6,92 \text{ kWh/t}$.

Los resultados obtenidos, tanto de huella de carbono como de energía embebida, están referidos a *tonelada de producto para su carga en secadero*.

➤ **Secado (A3c)**

Se incluye el impacto asociado al consumo del secadero. A partir de la información reflejada en el capítulo de inventario, la huella de carbono tendrá un valor asociado únicamente al consumo eléctrico del secadero. Con base en estas consideraciones, se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de HdC:

$$\text{HdC A3b} = (\text{Ce} * \text{Fee})$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Fee: Factor emisión electricidad (kgCO_2/kWh).

$$\text{HdC A3c} = 21,60 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será *180,00 kWh/t*.

Los resultados se refieren a *tonelada de producto seco*.

➤ **Cocción (A3d)**

Al igual que en el caso del secado, en la etapa de cocción existe también un importante número de factores que influyen de manera más o menos determinante en el valor total del consumo energético unitario (tipología de horno, pérdidas, temperatura y ciclo de cocción, contenido en carbonatos, tecnología, etc.), lo que supone una dificultad para establecer un valor fijo, tanto para la HdC como para Ee.

En el caso del cálculo de la HdC, en la etapa de cocción, se despeja la siguiente fórmula:

$$\text{HdC A3d} = (\text{Ct} * \text{fc}) + (\text{Ce} * \text{fe})$$

Donde:

Ct: Consumo unitario térmico ($\text{kg carbón/tonelada producto}$).

fc: factor de emisión del combustible.

Ce: Consumo unitario eléctrico.

fe: Factor de emisión eléctrico.

$$\text{HdC A3d} = 235,63 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

Los resultados se refieren a *tonelada de producto cocido*.

En cuanto a la Ee, se calcula según la siguiente fórmula:

$$\text{Ee A3d} = (\text{Cc} * \text{fc}) + \text{Ce}$$

Donde:

Cc: Consumo unitario térmico (kWh/t).

Fc: Factor de conversión.

Ce: Consumo unitario eléctrico (kWh/t).

Con estos datos, se obtienen los siguientes valores de Ee:

$$Ee A3d = 689,74 kWh/t$$

Los resultados obtenidos están referidos a *tonelada de producto cocido*.

► Clasificación y empaque (A3e)

La HdC de este módulo tendrá un valor asociado al consumo eléctrico de la maquinaria. A partir de estas consideraciones se despeja la siguiente fórmula para el cálculo de la HdC:

$$HdC A3e = (Ce * Fee)$$

Donde:

Ce: Consumo eléctrico unitario.

Fee: Factor emisión electricidad (kgCO₂/kWh).

$$HdC A3e = 0,23 kgCO_{2equiv}/t$$

La energía embebida de esta etapa será *1,92 kWh/t*.

Los resultados se refieren a *tonelada de producto acabado*.

31.2 Resultados globales

Con los valores obtenidos de HdC y Ee, para cada una de las etapas consideradas dentro de los límites del sistema en estudio, se obtienen los valores medios globales reflejados en la tabla 42.

Tabla 42. Valores de HdC y Ee (módulos A1, A2 y A3)

HdC (kg CO _{2equiv} /t)							
HdC A1	HdC A2	HdC A3					TOTAL
		HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d	HdC A3e	
2,95	1,94	0,64	0,83	21,60	235,63	0,23	238,82

Ee (kWh/t)							
Ee A1	Ee A2	Ee A3					TOTAL
		Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d	Ee A3e	
10,93	7,20	4,67	6,92	180,00	689,74	1,92	901,38

31.3 Asignación a unidad declarada

Para obtener el valor global, es necesario que cada uno de los valores, tanto de huella de carbono como de energía embebida, esté referido a la unidad declarada definida en el presente estudio, de *tonelada de producto acabado*.

Sin embargo, los valores obtenidos para cada una de las fases incluidas dentro de los límites del sistema están referidos a una unidad distinta, como se indica a continuación:

- A1 (extracción materias primas): tonelada de arcilla extraída.
- A2 (transporte de materias primas a planta): tonelada de arcilla transportada.
- A3a (almacenamiento, carga y molienda): tonelada de arcilla preparada.
- A3b (moldeo): tonelada de producto listo para entrada en secadero.
- A3c (secado): tonelada de producto en seco.
- A3d (cocción): tonelada de producto cocido.
- A3e (empaque): tonelada de producto acabado apilado en patio.

Por lo tanto, se debe hallar la equivalencia entre la unidad declarada y las unidades a las que están referidos los valores de cada una de las fases estudiadas. Se explica tal y como sigue a continuación:

- Arcilla extraída, transportada, molida (A1, A2, A3a).
- Arcilla molida + % agua añadida en amasado = Producto para entrada en secadero (A3b).
- Producto de entrada en secadero – % agua perdida en proceso de secado = Producto seco (A3c).
- Producto seco – % pérdida de peso en cocción = Producto cocido (A3d).
- Producto cocido – % roturas = Producto acabado (A3e).

Así, para un producto tipo, con un 13% de agua añadido en el amasado, un 19% de pérdida de humedad en secado, un 6,3% de pérdida de peso, un 2% de roturas, los valores de HdC y Ee corregidos y referidos a la unidad declarada serán los siguientes (por 1.000 kg de arcilla extraída y transportada):

- Producto en verde = 1.130,00 kg.
- Producto seco = 915,30 kg.
- Producto cocido = 857,64 kg.
- Producto terminado empacado = 840,48 kg.

A modo de ejemplo, para obtener el valor global, referido a la unidad funcional, se deberá aplicar un coeficiente corrector a cada uno de los valores obtenidos, conforme a la siguiente regla:

- $HdC A3d^1 = HdCA3d + \% \text{ roturas}$
- $HdC A3c^1 = HdC A3c \text{ (producto seco)} + \% \text{ pérdida de peso en cocción} + \% \text{ roturas}$
- $HdC A3b^1 = HdC A3b \text{ (producto en verde)} + \% \text{ pérdida de humedad en secado} + \% \text{ pérdida de peso en cocción} + \% \text{ roturas}$
- $HdC A2^1 = HdC A2 - \% \text{ agua amasado} + \% \text{ pérdida de humedad en secado} + \% \text{ pérdida de peso en cocción} + \% \text{ roturas}$
- $HdC A1^1 = HdC A1 - \% \text{ agua amasado} + \% \text{ pérdida de humedad en secado} + \% \text{ pérdida de peso en cocción} + \% \text{ roturas}$

De este modo se obtienen los valores revisados y referidos a la unidad declarada (tabla 43).

Tabla 43. Valores de HdC y Ee asignados a unidad declarada (módulos A1, A2 y A3)

HdC (kg CO ₂ equiv./t)							
HdC A1	HdC A2	HdC A3					TOTAL
		HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d	HdC A3e	
4,62	2,85	0,76	1,1280	23,52	240,44	0,234	273,54
Ee (kWh/t)							
Ee A1	Ee A2	Ee A3					TOTAL
		Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d	Ee A3e	
17,14	10,57	5,56	9,30	196,02	703,81	1,92	944,33

32. Evaluación de impactos. Proceso innovador

En este numeral se procede a repetir los mismos pasos dados en el numeral anterior para el cálculo de la HdC y Ee del proceso convencional, pero en esta ocasión con los datos que se obtendrían en el proceso innovador, resultado de la aplicación del nutriente tecnológico (10% de cenizas volantes en peso) en la fabricación del producto cerámico.

32.1 Clasificación y ordenación

Los procesos que se modifican respecto del proceso convencional son los siguientes:

32.1.1 Extracción (A1)

El proceso de extracción de materias primas queda modificado en tanto que se sustituye un 10% de la materia prima convencional (arcillas) por cenizas volantes procedentes de la central termoeléctrica.

En este sentido, la HdC de este proceso será el resultado de sumar la HdC de extracción de las arcillas y la HdC del proceso de la carga de cenizas volantes en camiones para su transporte a la planta de producción de la ladrillera, en relación 90%/10%.

De los cálculos del proceso convencional se obtiene que la HdC para extracción de arcillas es $2,95 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$.

Para el caso de la carga de cenizas volantes en camiones en la planta de Termostasajero, los datos son los correspondientes a la pala cargadora (7,72 l/h y 144 t/h). Con estos se obtiene una HdC de $0,15 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$, referida a *tonelada de ceniza volante cargada en camión*.

Para el caso de la Ee, el proceso de extracción convencional arroja un resultado de $10,93 \text{ kWh}/t$, mientras que la carga de cenizas volantes tiene asociada una Ee de $0,54 \text{ kWh}/t$.

Con estos datos se obtiene la HdC para el proceso innovador:

$$\text{HdC A1} = \text{HdC extracción arcillas} * 0,9 + (\text{HdC carga cenizas}) * 0,1 = 2,67 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t.$$

Aplicando la misma fórmula para el cálculo de la Ee, se obtiene un valor de $9,89 \text{ kWh}/t$.

32.1.2 Transporte a planta (A2)

Al igual que ocurre en el caso de la extracción de materias primas de las canteras, de esta etapa se considera únicamente el impacto asociado al consumo del combustible.

El consumo unitario viene dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo unitario (l/t)} = \frac{C_v}{C_t} * D * 2$$

Donde:

Cv: Consumo vehículo transporte (l/km).

Ct: Carga vehículo transporte (t).

D: Distancia recorrida desde la cantera a la planta.

2: Factor fijo (al considerar el recorrido de ida y de vuelta).

Para el caso del proceso convencional, el valor obtenido es de $1,9406 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$.

Para el caso del transporte de cenizas volantes, la distancia es 18 km; por tanto:

HdC A2 = consumo (l/ton * km) * (distancia (km) * 2) * factor emisión

$$\text{HdC A2} = 0,56 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

Con estos datos se obtiene la HdC para el proceso innovador:

$$\text{HdC A1} = \text{HdC extracción arcillas} * 0,9 + (\text{HdC carga cenizas}) * 0,1 = 1,91 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

Aplicando la misma fórmula para el cálculo de la Ee, se obtiene un valor de $7,07 \text{ kWh/t}$, referido a *tonelada de ceniza (materia prima) transportada*.

32.1.3 Fabricación de productos (A3)

Se desglosa, al igual que en la fase de inventario, el cálculo de la HdC y Ee para cada una de las subetapas de la etapa de fabricación de productos.

► Almacenamiento, carga y molienda (A3a)

Este proceso no sufre alteración en lo que respecta a HdC y Ee, por lo que los valores obtenidos son los mismos que en el proceso convencional:

$$\text{HdC A3a} = 0,64 \text{ kg CO}_{2\text{equiv}}/t$$

$$\text{Ee A3a} = 4,67 \text{ kWh/t}$$

Los resultados obtenidos, tanto de huella de carbono como de energía embebida, están referidos a *tonelada de materia cargada en tolva*.

► Moldeo (A3b)

Este proceso no sufre alteración en lo que respecta a HdC y Ee, por lo que los valores obtenidos son los mismos que en el proceso convencional:

$$\text{HdC A3b} = 0,83 \text{ CO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será $6,92 \text{ kWh/t}$.

Los resultados obtenidos, tanto de huella de carbono como de energía embebida, están referidos a *tonelada de producto para su carga en secadero*.

➤ **Secado (A3c)**

Este proceso tampoco sufre alteración significativa, por lo que los valores que se obtienen son los mismos que los referidos al proceso convencional:

$$\text{HdC A3c} = 21,60 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

La energía embebida de esta etapa será $180,00 \text{ kWh/t}$.

Los resultados se refieren a *tonelada de producto seco*.

➤ **Cocción (A3d)**

En el caso de la cocción, los resultados que se han obtenido en el estudio de consumo energético de la mezcla de 90% de arcilla y 10% de ceniza volante son los siguientes:

- Cantidad de carbón necesario por quema: 14.002,80 kg.
- Ahorro de carbón respecto de proceso convencional: 997,20 kg.
- Ahorro energético: 6,65%
- Consumo eléctrico: 10,80 kWh/t.

La HdC, en la etapa de cocción, se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\text{HdC A3d} = (\text{Ct} * \text{fc}) + (\text{Ce} * \text{fe})$$

Donde:

Ct: Consumo unitario térmico (kg carbón/tonelada producto).

fc: Factor de emisión del combustible.

Ce: Consumo unitario eléctrico.

fe: Factor de emisión eléctrico.

$$\text{HdC A3d} = (77,79 * 2,81) + (10,80 * 0,12) = 220,05 \text{ kgCO}_{2\text{equiv}}/t$$

Los resultados se refieren a *tonelada de producto cocido*.

En cuanto a la Ee, se calcula según la siguiente fórmula:

$$Ee A3d = (Cc * fc) + Ce$$

Donde:

Cc: Consumo unitario térmico (kWh/t).

Fc: Factor de conversión.

Ce: Consumo unitario eléctrico (kWh/t).

Con estos datos, se obtienen los siguientes valores de Ee:

$$Ee A3d = (77,79 * 8,14) + 10,80 = 644,60 kWh/t$$

Los resultados obtenidos están referidos a *tonelada de producto cocido*.

► Clasificación y empaque (A3e)

Este proceso tampoco sufre alteración a nivel de huella de carbono y energía embebida, por lo que los resultados son los mismos que para el proceso convencional y se refieren a *tonelada de producto acabado*.

$$HdC A3e = (1,92 * 0,120) = 0,23 kgCO_{2equiv}/t$$

La energía embebida de esta etapa será *1,92 kWh/t*.

32.2 Resultados globales

Con los valores obtenidos de HdC y Ee, para cada una de las etapas consideradas dentro de los límites del sistema en estudio, se obtienen los valores medios globales para el proceso de fabricación innovador (tabla 44).

Tabla 44. Valores de HdC y Ee del proceso de fabricación innovador (módulos A1, A2 y A3)

HdC (kg CO _{2equiv} /t) proceso innovador							
HdC A1	HdC A2	HdC A3					TOTAL
		HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d	HdC A3e	
2,67	1,91	0,64	0,83	21,60	220,05	0,23	247,93
Ee (kWh/t) proceso innovador							
Ee A1	Ee A2	Ee A3					TOTAL
		Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d	Ee A3e	
9,89	7,07	4,67	6,92	180,00	644,60	1,9200	855,07

32.3 Asignación a unidad declarada

En el caso del proceso innovador, los datos necesarios para referir a cada una de las etapas a la unidad declarada son un 13% de agua añadido en el amasado, un 17% de pérdida de humedad en secado, un 6,3% de pérdida de peso y un 2% de roturas. Así, los valores de HdC y Ee serán los que se presentan en la tabla 45.

Tabla 45. Valores de HdC y Ee asignados a unidad declarada (módulos A1, A2 y A3)

HdC (kg CO _{2equiv} /t) proceso innovador							
HdC A1	HdC A2	HdC A3					TOTAL
		HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d	HdC A3e	
4,18	2,80	0,76	1,12	25,52	224,54	0,23	257,16
Ee (kWh/t) proceso innovador							
Ee A1	Ee A2	Ee A3					TOTAL
		Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d	Ee A3e	
15,51	10,38	5,56	9,30	196,02	657,76	1,92	896,45

32.4 Consideraciones finales

Con los valores obtenidos de HdC y de Ee para cada una de las etapas consideradas dentro de los límites del sistema en estudio, y revisados para que el resultado de cada uno de los módulos quede referido a la unidad declarada, se obtienen los valores medios globales, para cada uno de los productos estudiados en esta investigación, que se muestran en la tabla 45 siempre considerando los valores estimados de agua añadida en amasado, pérdida de humedad en secado, pérdida de peso en cocción y de roturas indicados anteriormente.

32.5 Análisis comparativo

Una vez obtenidos los datos correspondientes de la HdC y de Ee tanto del proceso convencional de fabricación de productos cerámicos, aplicado al caso de estudio de la ladrillera, como de los datos que se obtendrían como resultado de sustituir un 10% de arcillas de la materia prima por cenizas volantes procedentes de la central de termoeléctrica, se procede a realizar un análisis comparativo de dichos resultados.

Tabla 46. Comparativa de valores de HdC y Ee obtenidos

	HdC (kg CO _{2equiv} /t)							TOTAL
	HdC A1	HdC A2	HdC A3				TOTAL	
			HdC A3a	HdC A3b	HdC A3c	HdC A3d		
Proceso convencional (110% arcillas)	4,62	2,85	0,76	1,1280	23,52	240,44	0,23	273,54
Proceso innovador (10% cenizas)	4,18	2,80	0,76	1,12	25,52	224,54	0,23	257,16
Ee (kWh/t)								
	Ee A1	Ee A2	Ee A3				TOTAL	
			Ee A3a	Ee A3b	Ee A3c	Ee A3d		Ee A3e
Proceso convencional (110% arcillas)	17,14	10,57	5,56	9,30	196,02	703,81	1,92	944,33
Proceso innovador (10% cenizas)	15,51	10,38	5,56	9,30	196,02	657,76	1,92	896,45

Las consecuencias medioambientales de la adición de un 10% de cenizas volantes como materia prima en el proceso de fabricación de productos cerámicos son claramente positivas. Así, la huella de carbono se ve reducida en 16,39 kg CO_{2equiv}/t producto acabado, lo que supone un descenso de un 5,99% de la huella de carbono respecto del proceso convencional. La energía embebida se ve reducida igualmente en 47,88 kWh/t de producto acabado.

La etapa de cocción de producto es la que representa un mayor descenso de huella de carbono y energía embebida. Otras etapas no sufren alteración en cuanto a valores, mientras que otras (como el secado) tienen un mayor impacto ambiental. Esto es debido a las pérdidas de masa en cocción de la mezcla con cenizas respecto de la convencional, que tienen su repercusión en las etapas “aguas arriba”, aunque el resultado global es claramente favorecedor para el proceso innovador.

Esta reducción se produce sin necesidad de modificaciones en el proceso de producción respecto del proceso convencional, por lo que se obtiene una ventaja medioambiental a un coste económico nulo. Al contrario, el uso de cenizas

volantes reduce el coste económico asociado a la adquisición de materias primas y transporte de estas hasta la planta de producción.

Para el caso de la producción de la ladrillera, la reducción anual de emisiones asociadas al proceso productivo sería de 70,79 toneladas de CO₂/año.

La viabilidad medioambiental del uso de cenizas volantes en la fabricación de productos cerámicos queda demostrada a partir del análisis de huella de carbono y energía embebida llevado a cabo.

Es importante destacar en este punto que otros aspectos de interés medioambiental, y positivos para la economía circular no han sido analizados de manera comparativa al ser claramente favorecedor el uso de cenizas volantes. Aspectos como el tratamiento de residuos, la extracción de recursos naturales, el consumo de recursos energéticos, etc., son parámetros que se ven favorecidos con el uso de cenizas volantes en el proceso de fabricación de productos cerámicos.